

Florian Klapproth

Das modale Zeitgedächtnis

Untersuchungen zur Abhängigkeit
der Gedächtnisleistung für kurze Zeitintervalle
von der Reizmodalität

Vom Fachbereich 1 (Erziehungs- und Sozialwissenschaften)
der Universität Hildesheim zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Philosophie (Dr. phil.)
angenommene Dissertation von Florian Klapproth,
geboren am 18. Mai 1971 in Tettnang.

Gutachter:

Prof. Dr. Hede Helfrich-Hölter (Hildesheim),
Prof. Dr. Werner Greve (Hildesheim),
Prof. Dr. Dirk Vorberg (Braunschweig).

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2003.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Danksagung	10
THEORETISCHER TEIL	11
Das Abbildungsproblem	11
Was ist Zeit?	11
Entstehung der Idee von Zeit	11
Objektive Zeit	12
Der Widerspruch zwischen objektiver und subjektiver Zeit	15
Subjektive Zeit	17
Ebenen subjektiver Zeit	20
<i>Ebene 1: Die Empfindung des Wechselspiels zwischen Konstanz und Veränderung. „Wahrnehmung“ von Simultaneität, Sukzession und Dauer.</i>	21
<i>Ebene 2: Die Beurteilung einer Dauer. Die zwei Perspektiven der Kompensation des Fehlens eines Sinnesorgans für Zeit.</i>	22
<i>Zeitbeurteilung als quasi-sensorischer Prozeß</i>	23
<i>Zeitbeurteilung als kognitive Konstruktion</i>	26
<i>Ebene 3: Der Zeitbegriff.</i>	28
Quantitative Theorien psychologischer Zeit	32
Schrittmacher-Akkumulator-Systeme	32
<i>Die Modelle von Creelman und Treisman</i>	33
<i>Die Geschwindigkeit der inneren Uhr</i>	35
<i>Zeitquantenmodelle</i>	37
<i>Die scalar timing theory</i>	38

<i>Die behavioral theory of timing</i>	43
Das Gedächtnis für Zeitintervalle	44
<i>Das Kurzzeitgedächtnis für Zeitintervalle</i>	44
<i>Der „choose-short effect“</i>	44
<i>Kapazitätsbeschränkungen und funktionale Komponenten des Kurzzeitgedächtnisses für Zeitintervalle</i>	47
<i>Das Langzeitgedächtnis für Zeitintervalle</i>	49
Entscheidungskriterien	52
Variabilität von Zeitschätzungen	54
<i>Variabilität des Schrittmachers</i>	55
<i>Variabilität des Akkumulators</i>	58
<i>Variabilität des Schalters</i>	58
<i>Variabilität der Gedächtnisrepräsentation</i>	59
<i>Variabilität des Vergleichsprozesses</i>	61
 Der Einfluß nichtzeitlicher Variablen auf Zeitschätzungen	 65
Die Stimulusabhängigkeit von Zeitschätzungen	66
<i>Das filled-duration-Phänomen</i>	66
<i>Die physikalischen Eigenschaften der Stimuli</i>	68
Der Kontext von Zeitschätzungen	68
Zeitschätzung und Aufmerksamkeit	72
Der Modalitätseffekt bei Zeitschätzungen	75
Zusammenfassung	78
 Der Anteil des Gedächtnisses am Modalitätseffekt	 81
Modalitätsspezifische Repräsentationen	81
Modalitätsübergreifende Repräsentationen	83

Ableitung der Fragstellung: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Reizmodalität und dem Gedächtnis für Zeitintervalle?	85
Das Gedächtnis für Zeitintervalle in quantitativen Modellen	85
Der ausgeklammerte Zusammenhang zwischen der Dauer und ihrem Trägersignal	86
Die Modalität als Instrument zur Untersuchung der Repräsentation von Zeitintervallen	89
Die <i>scalar timing theory</i> als theoretischer Rahmen der Untersuchung	91
 Verwendete Methode und ihre Begründung	93
Kriterien für die empirische Erfassung des Gedächtnisses für Zeitintervalle	94
Die Methode des <i>temporal generalization</i>	95
Variation der unabhängigen Variablen und abhängiges Maß	99
Prospektives Design	102
Das Untersuchungsdesign im Lichte der vier kritischen Aspekte	103
 EMPIRISCHER TEIL	104
 Allgemeine Methode	104
Versuchspersonen	104
Material, Hilfsmittel und Geräte	104
Instruktion und Versuchsablauf	105
 Experiment 1	110
Ableitung von psychologischen Hypothesen und Aufstellen testbarer statistischer Hypothesen	110
<i>Ableitung der psychologischen Hypothesen</i>	110
<i>Aufstellen der statistischen Hypothesen</i>	111
Methode	114

<i>Versuchspersonen</i>	114
<i>Material, Hilfsmittel und Geräte</i>	114
<i>Instruktion und Versuchsablauf</i>	114
Ergebnisse	114
<i>Prüfung der SH 1-1</i>	116
<i>Prüfung der SH 1-2</i>	117
Diskussion	118
 Experiment 2	 120
Ableitung von psychologischen Hypothesen	
und Aufstellen testbarer statistischer Hypothesen	120
<i>Ableitung der psychologischen Hypothesen</i>	120
<i>Aufstellen der statistischen Hypothesen</i>	121
Methode	123
<i>Versuchspersonen</i>	123
<i>Material, Hilfsmittel und Geräte</i>	123
<i>Instruktion und Versuchsablauf</i>	123
Ergebnisse	124
<i>Prüfung der SH 2-1a</i>	124
<i>Prüfung der SH 2-1b</i>	125
<i>Prüfung der SH 2-2</i>	125
Diskussion	126
 Experiment 3	 127
Ableitung von psychologischen Hypothesen	
und Aufstellen testbarer statistischer Hypothesen	127
<i>Ableitung der psychologischen Hypothesen</i>	128
<i>Aufstellen der statistischen Hypothesen</i>	130

Methode	131
<i>Versuchspersonen</i>	131
<i>Material, Hilfsmittel und Geräte</i>	131
<i>Instruktion und Versuchsablauf</i>	132
Ergebnisse	132
<i>Prüfung der SH 3-1</i>	133
<i>Prüfung der SH 3-2</i>	135
Diskussion	135

Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse aus den Experimenten 1-3 und Entwicklung eines theoretischen Modells zur Quantifizierung

des gefundenen Effekts	138
<i>Bestimmung der Fehlergröße unter der Additivitätshypothese</i>	141
<i>Bestimmung der Fehlergröße unter der Proportionalitätshypothese</i>	146
<i>Empirische Entscheidung über die konkurrierenden Modelle</i>	148

Experiment 4

Ableitung von psychologischen Hypothesen und Aufstellen testbarer statistischer Hypothesen	150
<i>Ableitung der psychologischen Hypothesen</i>	150
<i>Aufstellen der statistischen Hypothesen</i>	150
Methode	153
<i>Versuchspersonen</i>	153
<i>Material, Hilfsmittel und Geräte</i>	153
<i>Instruktion und Versuchsablauf</i>	154
Ergebnisse	154
<i>Prüfung der SH 4-1 und der SH 4-2b</i>	155
<i>Prüfung der SH 4-2a</i>	156

Diskussion	157
Experiment 5	159
Ableitung von psychologischen Hypothesen und Aufstellen testbarer statistischer Hypothesen	159
<i>Ableitung der psychologischen Hypothese</i>	159
<i>Aufstellen der statistischen Hypothesen</i>	159
Methode	161
<i>Versuchspersonen</i>	161
<i>Material, Hilfsmittel und Geräte</i>	161
<i>Instruktion und Versuchsablauf</i>	162
Ergebnisse	162
<i>Prüfung der SH 5a</i>	163
<i>Prüfung der SH 5b</i>	164
Diskussion	165
 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse aus den Experimenten 4 und 5 und inhaltliche Spezifizierung des theoretischen Modells zur Begründung des gefundenen Effekts	 166
Experiment 6	170
Ableitung von psychologischen Hypothesen und Aufstellen testbarer statistischer Hypothesen	172
<i>Ableitung der psychologischen Hypothesen</i>	172
<i>Aufstellen der statistischen Hypothesen</i>	175
Methode	177
<i>Versuchspersonen</i>	177
<i>Material, Hilfsmittel und Geräte</i>	178

<i>Instruktion und Versuchsablauf</i>	178
Ergebnisse	180
<i>Prüfung der SH 6-1a gegen die SH 6-1b</i>	181
<i>Prüfung der SH 6-2</i>	181
Diskussion	182
Allgemeine Diskussion	185
Die Aufgabe – ein Rekognitionstest?	187
Erinnern als Funktion des Enkodierens	188
Gedächtnissysteme	191
Die Enkodierspezifität bei der Erinnerung von Zeitintervallen	192
Aktivierung von gespeicherten Zeitintervallen	193
Analoger oder diskreter Vergleich von Zeitintervallen?	194
Integration der Ergebnisse von Experiment 3 und 6	202
Ein modales Modell des Gedächtnisses für Zeitintervalle	206
<i>Enkodierung und Gedächtnisrepräsentation</i>	210
<i>Aktivierung der Referenzdauer und Vergleich mit dargebotener Dauer</i>	212
Fazit und Ausblick	213
Literatur	215
Appendix	245
Appendix 1: Methoden der zeitpsychologischen Forschung	245
Appendix 2: Entscheidungszeiten	249
Appendix 3: Ableitung der Grenzwerte unter der Annahme der Veränderung der Gedächtnisdauer s	249
Zusammenfassung	252

Vorwort

Zeit ist so universell wie unverständlich. Die vielzitierte Antwort von Augustinus von Hippo auf die Frage, was Zeit sei („Si nemo ex me quaerat, scio; si quaerenti explicare velim, nescio.“¹) deutet auf die Schwierigkeiten hin, mit denen Wissenschaftler, die sich des Themas anvertrauen, konfrontiert sind. Beileibe fast jede wissenschaftliche Disziplin befaßt sich mit der Zeit. So auch die Psychologie. Jahrzehntelange Forschung hat zu einer mittlerweile fast unüberschaubaren Fülle gerade von empirischem Ergebnismaterial geführt, und doch ist noch kein Konsens über die Vorstellungen von dem Abbild der Zeit geschaffen worden. Unterschiedliche Theorien über Phänomene wie Zeitempfindungen, Zeitschätzungen und Zeitbegriffe, deren gemeinsames Merkmal ihr Abbildcharakter ist, existieren teilweise in Überlappung zueinander, mehrheitlich jedoch nebeneinander und manchmal auch gegeneinander. Der forschende Psychologe hat die Wahl, sich eines der herrschenden Paradigmen anzunehmen und somit Zeit aus einem ganz bestimmten, eng umrissenen Blickwinkel zu betrachten. Was fehlt, sind Grenzüberschreitungen zwischen den Paradigmen. In jüngerer Zeit sind Ansätze entstanden, die mit einigem Erfolg versucht haben, einander widersprechende theoretische Modelle zu verbinden. In dieser Linie soll auch diese Arbeit stehen. Gerade die Untersuchung der Zeit stellt eine Herausforderung dar, die anzunehmen den Mut benötigt, neue Argumente in die wissenschaftliche Diskussion zu werfen.

Florian Klapproth, Göttingen und Hildesheim, im Mai 2003

¹ „Wenn niemand mich danach fragt, weiß ich es; wenn ich es jemandem erklären will, weiß ich es nicht“.

Danksagung

Es sei allen gedankt, die mich bei der Planung und Durchführung von Experimenten und Manuskript unterstützt haben: Hede Helfrich, Carola Lindner-Müller und Ulrich Seidler-Brandler (für hilfreiche Diskussionen); Anja Bode, Evelina Jastrzembski und Luisa Lange (für die Durchführung der Experimente); Heidi Köpsel, Nina Schulz und Nicola Wilmers (als Kolleginnen und Versuchspersonen) und der Forschungskommission der Uni Hildesheim, die mir die Finanzierung von Versuchspersonen und Hilfskräften ermöglichte.

Und allen, die als Versuchsperson die Experimente über sich haben ergehen lassen.

Für Antje und Kolja.

THEORETISCHER TEIL

Das Abbildungsproblem

Wenn Psychologen sich mit dem Thema Zeit befassen, dann meinen sie in der Regel subjektive Zeit – konzeptionalisiert als Zeitempfinden, Zeitgefühl, Zeitschätzung etc. Die Beforschung subjektiver Zeit erfordert aber gerade auch, Zeit *an sich* – objektive Zeit – zu betrachten, weil alles Subjektive ein diesem gegenüber Äußerliches benötigt.

Was ist Zeit?

Zunächst ein paar *philosophische Grundlagen* zu Raum und Zeit, über die weitgehend Konsens bestehen dürfte. Der *Raum* zeigt sich in der Ausdehnung der materiellen Dinge, in ihrer Lage zueinander und in ihren Entfernungen voneinander, kurz: in ihrem *Nebeneinander-Bestehen*. Die Bewegung der materiellen Dinge ist mit Veränderungen des Ortes, der Lage, der Entfernungen, der Ausdehnung verbunden. D. h. die Bewegung vollzieht sich im Raum.

Die *Zeit* erscheint in der Dauer der materiellen Prozesse und in ihrer Aufeinanderfolge, kurz: *im Nacheinander-Existieren* der Dinge und Zustände. Die Dinge entstehen und vergehen, sie bewegen sich und verändern sich in kürzeren oder längeren Zeitspannen. Die Zeit ist im Gegensatz zum Raum *eindimensional*. Alle Ereignisse und Prozesse verlaufen nur in einer einzigen Richtung: von der Vergangenheit über die Gegenwart zur Zukunft.

Entstehung der Idee von Zeit

Bereits seit den Anfängen der ersten Hochkulturen der Menschheitsgeschichte ist das Phänomen „Zeit“ Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtung. Das Phänomenale an der Zeit

ist ihre Nicht-Materialität, also die Unmöglichkeit, ihr etwas Gegenständliches zuordnen zu können. Trotzdem wurde sie mehr und mehr zum Maßstab von Veränderungen jeglicher Art, der Begriff von der Zeit ist ein Beispiel für die rein menschliche Fähigkeit, der gegenständlichen Veränderung eine nicht-gegenständliche Abstraktion entgegenzusetzen.

Ausgangspunkt dieser Abstraktionsbildung wird wohl die Notwendigkeit gewesen sein, Vorhersagen über bestimmte Bewegungsformen machen zu wollen. Periodische Veränderungen wie der Tagesverlauf, die Monate und die Jahreszeiten bestimmten, wann der steinzeitliche Mensch zur Jagd ging, wann der Boden bearbeitende Mensch mit der Aussaat beginnen mußte, wann das Vieh zur Deckung gebracht werden mußte etc. Das Erkennen dieser natürlichen Periodizität war die Voraussetzung für den Erfolg dieser ersten menschlichen Kulturleistungen. Das praktische Umsetzen dieser Erkenntnis auf die Produktion von Nahrungsmitteln kann sicherlich als Voraussetzung dafür angesehen werden, daß der Mensch das Phänomen der Zeit bzw. das Phänomen der Veränderung näher untersuchte.

Bereits um das Jahr 5000 v. Chr. wurden in Ägypten Sonnenuhren zur Zeitmessung verwendet. Aus China sind Sonnenuhren aus der Zeit um 3000 v.Chr. bekannt, Sonnenuhren gab es auch bei den Inkas, vermutlich in Verbindung mit kultischen Zwecken, und in Indien schuf Jai Singh um 1700 gewaltige Sonnenobservatorien. In allen Kulturen stellt die Sonnenuhr das erste Zeitmeßinstrument dar.

Die Jahre der Ägypter summierten sich nicht zu größeren Einheiten, sondern bildeten den größten begrifflichen Zyklus und ließen nach ihrem Ablauf die Zeit von neuem beginnen (Assmann, 1998).

Objektive Zeit

Ausgangspunkt für die Untersuchung der Zeit ist die Veränderung von Dingen, also ein gegenständlicher, materieller Prozeß. So verschieden die eine Veränderung von einer anderen sein kann, gibt es dennoch etwas allen Veränderungen Gemeinsames, nämlich die Dimensionen ihrer Existenz: Raum und Zeit. Raum und Zeit stellen also universelle Größen

dar, mit denen materielle Dinge und Verhältnisse und deren Veränderungen beschreibbar sind.

Noch heute wirken der philosophische Einfluß des englischen Empirismus und dessen Bezüge zur Kantschen Philosophie auf die moderne empirische Psychologie. Deshalb sollen einige philosophische Konzepte von Zeit, die in und nach der Epoche Kants entwickelt wurden, skizziert werden.

In der philosophischen Entwicklung der Betrachtung von Zeit stand immer auch die Frage im Vordergrund, ob Zeit objektiv vorhanden oder andernfalls nur das Produkt unserer Idee sei. Der *philosophische Idealismus* sah in der Zeit ein rein subjektives Phänomen. Kant (1724-1804) bestimmte Raum und Zeit als „Anschauungsformen a priori“. Sie entstünden nicht durch Erfahrung, seien also nicht empirisch, sondern eine *Form* der Erfahrung und damit *a priori* gegeben. Raum und Zeit seien nicht Eigenschaften der Dinge, sondern Erkenntnisvermögen des Subjekts, d. h. Formen der reinen Anschauung. Zeit sei nicht Eigenschaft eines Dings, sondern Zeit müsse vorweg sein, damit sich Dinge konstituieren können. Er schreibt:

Die Zeit ist also lediglich eine subjektive Bedingung unserer Anschauung, und an sich, außer dem Subjekte, nichts. Nichts desto weniger ist sie in Ansehung aller Erscheinungen, mithin auch aller Dinge, die uns in der Erfahrung vorkommen können, notwendigerweise objektiv. (Kant, 1956, S. 82)

Husserl (1859-1938) ordnet die Zeit ebenfalls dem Subjekt zu:

Wir können nicht anders sagen als: dieser Fluß ist etwas, das wir nach dem Konstituierten so nennen, aber es ist nichts zeitlich „Objektives“. Es ist die absolute Subjektivität und hat die absoluten Eigenschaften eines im Bilde als „Fluß“ zu bezeichnenden, in einem Aktualitätspunkt, Urquellpunkt, „Jetzt“ Entspringenden usw. (Husserl, 1980, S. 429)

Mach (1838-1916), österreichischer Physiker und Philosoph, betrachtete Raum und Zeit als vom Menschen geordnete Systeme von sog. Empfindungsreihen (Mach, 1897). Karl Pearson (1857-1936), englischer Philosoph, Physiker und Psychologe, sprach Raum und Zeit

ebenfalls ihre reale Existenz ab. Sie befänden sich nicht in den Dingen, sondern seien unsere Art, die Dinge wahrzunehmen (Pearson, 1900). McTaggart betrachtete Zeit als unreal, was bedeutet, daß Zeit keine subjektunabhängige Existenz aufweise.

Whenever we perceive anything in time—which is the only way in which, in our present experience, we do perceive things—we are perceiving it more or less as it really is not. (McTaggart, 1993, p. 34)

Im Gegensatz zum Idealismus vertritt der *philosophische Materialismus* eine gänzlich andere Auffassung vom Charakter der Zeit. Raum und Zeit werden dort als Existenzformen der Materie betrachtet, die objektiv gegeben, d. h. ohne Zutun des bewußten Menschens, vorhanden sind. Allerdings sind weder der Raum an sich noch die Zeit an sich materiell und können folglich nur als Abstraktionen aufgefaßt werden. „Die beiden Existenzformen der Materie (Raum und Zeit; d. Verf.) sind natürlich ohne die Materie nichts, leere Vorstellungen, Abstraktionen, die nur in unserem Kopf existieren“ (Engels, 1952, S. 251). Zeit existiert nur *in* der Veränderung von den Dingen, nicht außerhalb von ihr. Zeit ist ungleich der Veränderung. „Eben weil die Zeit von der Veränderung verschieden, unabhängig ist, kann man sie durch die Veränderung messen, denn zum Messen gehört immer ein von dem zu messenden Verschiedenes.“ (Engels, 1987, S. 71). Ein Argument gegen die Auffassung von Zeit als primär subjektiv wendet Lenin ein: „Die Existenz der Natur *in der* nach Millionen Jahren zu messenden *Zeit vor* dem Erscheinen des Menschen und der menschlichen Erfahrung beweist die Absurdität dieser idealistischen Theorie.“ (Lenin, 1977, S. 174; Hervorhebungen im Original; d. Verf.). Bieri (1972) argumentiert, daß die Zeiterfahrung sich nicht ohne die Annahme einer realen Zeitstruktur verstehen läßt.

Wenn Zeit nicht mehr ist als unsere Art, die Realität zu erfahren, so muß man (...) schließen, daß die erfahrende Subjektivität etwas Unzeitliches ist. Ist das der Fall, so ergibt sich aus der Realitätsbehauptung der Zeit gegenüber zwangsläufig die Frage, wie denn die Kenntnisaufnahme einer realen Zeit durch ein unzeitliches Subjekt denkbar sein soll. Die Argumentation dagegen, Zeiterfahrung als Erfahrung einer realen Zeit zu verstehen, ist dann überzeugend. (Bieri, 1972, S. 216)

Auch die Physik nahm sich des Problems der Zeit an. Newton (1643-1727) erkannte die objektive Realität von Raum und Zeit an, ging jedoch davon aus, daß sie unabhängig voneinander und von der sich bewegenden Materie existierten. Newton zufolge ist der Raum als unendlicher, leerer, homogener Behälter anzusehen, in dem sich die Vorgänge der Körperwelt abspielen. Als wesentliches Merkmal der Zeit sah er ihre Gleichförmigkeit und Nichtumkehrbarkeit an. In der zu Beginn des 20. Jahrhunderts von Einstein (1879-1955) ausgearbeiteten speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie wurden grundlegende Formen des Zusammenhangs zwischen Raum, Zeit und Materie beschrieben. So enthält die spezielle Relativitätstheorie das Postulat, daß die Gleichzeitigkeit von Ereignissen nicht absolut, sondern relativ ist. Verlaufen z. B. Ereignisse in Bezug auf ein materielles System gleichzeitig, so verlaufen sie hinsichtlich eines anderen Systems nacheinander. In der allgemeinen Relativitätstheorie wird der Zusammenhang zwischen Raum, Zeit und Materie noch deutlicher. Raum und Zeit sind nämlich abhängig von der Verteilung der Materie. Je mehr Materie einen bestimmten Raum erfüllt, desto stärker ist ihr Gravitationsfeld. Je stärker nun ein Gravitationsfeld, desto stärker wird der Raum „gekrümmt“ (d. h. desto stärker weicht der Raum von seinen euklidischen Maßen ab), und desto langsamer verläuft die Zeit.

Der Widerspruch zwischen objektiver und subjektiver Zeit

Letztendlich laufen alle Konzeptionen von Zeit auf den Widerspruch zwischen *objektiver* und *subjektiver* Zeit hinaus. Entweder wird Zeit als objektiv gefaßt; dann ist objektive Zeit das Primäre, subjektive Zeit das Sekundäre, das Abgeleitete und damit nichts als ein psychisches Abbild von objektiver Zeit. Oder Zeit ist an sich subjektiv, d. h. die Zeitempfindung ist das Primäre, der Ursprung der Zeit; dann ist subjektive Zeit identisch mit objektiver Zeit, oder besser, der Gegensatz zwischen objektiver und subjektiver Zeit wird aufgehoben im Subjekt.

Die erkenntnistheoretische Debatte um den Widerspruch zwischen objektiver und subjektiver Zeit wird in der empirischen Psychologie in erster Linie *praktisch* gelöst (ohne

sich möglicher erkenntnistheoretischer Konsequenzen immer bewußt zu sein). Subjektive Zeit, operationalisiert z. B. als Schätzung einer Dauer, wird in Relation gesetzt zu zwei externen Ereignissen: einerseits zu einem Ereignis, dessen Dauer von einem Subjekt geschätzt werden soll; andererseits zu einem Ereignis, dessen Dauer als Maßstab sowohl für die Dauer des externen Ereignisses als auch für die Schätzung derselben fungiert (zumeist die Uhr des Versuchsleiters). Innerhalb dieser Relationen wird subjektive Zeit gleich zweifach einer von dieser unabhängigen Zeit entgegengesetzt: Erstens soll subjektive Zeit die Dauer eines externen Ereignisses widerspiegeln. Den Forscher interessieren in der Regel Schätzgenauigkeit und Schätzfehler bezogen auf die externe Dauer. Zweitens liefert der Maßstab (die Uhr des Versuchsleiters) ein Kriterium für die Güte der Schätzung. Auch dieses Kriterium ist unabhängig von der Empfindung der schätzenden Person.

Wir können über subjektive Zeit nur soviel wissen, wie wir über objektive Zeit wissen, da subjektive Zeit immer in der ein oder anderen Form an objektiver Zeit relativiert wird. Wenn wir beispielsweise das Urteil einer Versuchsperson über das zeitliche Ausmaß eines Reizes befragen, dann werden wir ihre Antwort messen mit unserer „objektivierten“ Zeit, also z. B. mit der Uhr. Die Uhr wiederum ist Folge eines metrischen Zeitverständnisses. Das Urteil der Versuchsperson kann also in diesem Fall nur in Relation zur metrischen Zeit betrachtet und verstanden werden. Angenommen, die Zeit sei nicht metrisch: dann würde auch das, was wir als subjektive Zeit der Versuchsperson betrachten, andere Eigenschaften aufweisen als die, die wir bei Annahme eines metrischen Zeitkonzeptes zugrundelegen. Allerdings würden wir diese anderen Eigenschaften subjektiver Zeit nicht feststellen können, solange wir die Eigenschaften der objektiven Zeit, also der Zeit des Versuchsleiters, nicht erkannt haben.

Für eine empirische Arbeit wie diese kann das skizzierte erkenntnistheoretische Problem nicht einmal ansatzweise gelöst werden. Aber es soll um der besseren Einordnung des zu untersuchenden Phänomenbereichs willen eine pragmatische Positionierung im Sinne einer forschungsleitenden Heuristik vorgenommen werden. *Diese beinhaltet die Anerkennung, daß sämtliche Zeitschätzungen eines zu untersuchenden Subjekts als mehr oder weniger*

gelungene Widerspiegelungen einer experimentellen Zeitvorgabe betrachtet werden können. Die experimentelle Zeitvorgabe gründet sich auf ein metrisches Zeitverständnis, das in der Uhr seinen deutlichsten Ausdruck findet.

Subjektive Zeit

Die Psychologie beschäftigt sich vor allem mit *subjektiver Zeit*. Was aber ist subjektive Zeit? Phänomenologisch-empirisch äußert sich subjektive Zeit als Zeitempfindung, als Zeitschätzung oder als Zeitbegriff. Subjektive Zeit kann mit ihrer Äußerung gleichgesetzt werden, muß es aber nicht. Ebenso gut ist es möglich und je nach Fragestellung notwendig, subjektive Zeit als internalen, der Beobachtung nicht zugänglichen Prozeß zu verstehen. Dies ist vor allem dann erforderlich, wenn Theorien über das Zustandekommen von Zeitempfindungen, Zeitschätzungen und Zeitbegriffen entwickelt werden sollen. Wie die kognitive Psychologie macht auch die psychologische Erforschung subjektiver Zeit von Kodierungs- und Repräsentationsannahmen sowie von Annahmen über Informationsverarbeitungsprozesse Gebrauch. Bevor ein Subjekt eine Aussage über die Zeit eines bestimmten Ereignisses machen kann, muß diese über den Wahrnehmungsapparat in ein für weitere Verarbeitungsschritte kompatibles Format überführt werden, um dann später – am Ende des Verarbeitungsprozesses – als Aussage, bspw. verbal oder kinetisch, der Beobachtung durch andere zugänglich gemacht werden zu können. Von der Äußerung kann dann wiederum mit Unterstützung durch eine Theorie rückwirkend auf interne Prozesse geschlossen werden.

Jede Form subjektiver Zeit beinhaltet die Abstraktion der Zeit von der konkreten Veränderung, von dem konkreten Ereignis; denn Zeit an sich ist nicht wahrnehmbar (Gibson, 1975). Folglich muß die Zeit aus der Wahrnehmung der Dinge gewissermaßen extrahiert werden, damit Zeit empfunden werden kann. Der Widerspruch zwischen der abstrakten, nicht wahrnehmbaren Zeit und der konkreten, wahrnehmbaren Veränderung spiegelt sich auch in der Empfindung von Zeit wider. Einerseits kann Zeit nur über die Abstraktion erfahren werden, weil sie immateriell ist. Aus demselben Grund kann Zeit andererseits nur in

Verbindung mit der konkret gegenständlichen Veränderung begriffen werden - eben weil sie immateriell ist. Dieser Widerspruch reproduziert sich in allen Formen subjektiver Zeit.

Zur weiteren Systematisierung der Phänomenologie subjektiver Zeit soll ein Ebenenmodell eingeführt werden, in dem den einzelnen Ebenen unterschiedliche Erfahrungsformen von Zeit entsprechen. Bereits Fraisse (1985) hat subjektive Zeit in drei Kategorien unterteilt: (1) *Die Konditionierung auf Veränderungen*. Hierunter können sämtliche organische Periodizitäten subsummiert werden, die über die Umwelt induziert und später durch den Organismus selbst internalisiert und aufrechterhalten werden, wie z. B. der Tag-Nacht-Rhythmus oder der Ernährungsrhythmus (vgl. Aschoff, 1985). Diese Ebene kann als physiologische Uhr bezeichnet werden und befindet sich außerhalb des hier vorgeschlagenen Ebenenmodells subjektiver Zeit, weil kein psychisches Abbild der Zeit vorhanden sein muß. (2) *Die Wahrnehmung der Zeit*. Diese Kategorie ist mit der hier vorgeschlagenen untersten Ebene weitgehend identisch. (3) *Die Kontrolle über die Zeit*. Fraisse faßt unter diese Kategorie sowohl die Beurteilung von Zeit als auch den Zeitbegriff.

Auch Pöppel (1978, 1998) schlägt eine hierarchische Klassifikation subjektiver Zeit vor: eine *primäre* Ebene mit den vier Erlebniskategorien *Gleichzeitigkeit, Folge, Jetzt* und *Dauer*, und eine *sekundäre* Ebene des *Zeitbegriffs*.

Sowohl in der Klassifikation von Fraisse als auch in dem Ebenenmodell von Pöppel bildet die *subjektive Beurteilung der Dauer* keine eigenständige Kategorie, sondern ist entweder Teil des Zeiterlebens (Pöppel) oder Teil der Begriffsbildung von Zeit (Fraisse). Hier wird dagegen vorgeschlagen, daß die Beurteilung einer Dauer sich weder als Erlebnisphänomen noch als begriffliche Vorstufe fassen läßt, sondern vielmehr von beiden als eigenständiger Phänomenbereich abzugrenzen ist. Der Grund ist folgender: Die Beurteilung der Dauer ist ein (wenn auch subjektiver) Meßvorgang, also die Abbildung eines empirischen Systems auf ein numerisches System (Gigerenzer, 1981). Dies beinhaltet, daß die Dauer eines Ereignisses als Größe dargestellt werden kann, und setzt zum einen voraus, daß das messende Subjekt über ein solches numerisches System verfügt, d. h. die Dauer in irgendeiner Form *quantifizieren* kann, während die Quantifizierung der Dauer für deren Erleben nicht zwingend

notwendig ist. Zum anderen impliziert das Beurteilen resp. Messen einer Dauer deren Abstraktion von dem dauernden Ereignis, was ebenfalls für das Zeiterleben nicht zutrifft, da hier ja gerade das Ereignis selbst im Fokus der Aufmerksamkeit steht (*etwas* ist lang- oder kurzweilig). Schließlich sind für das Beurteilen der Dauer sowohl ein Gedächtnis als auch Entscheidungs- und Vergleichsprozesse notwendig, mit denen Maß und Gemessenes zueinander in Relation gebracht werden können. Damit sind kognitive Mechanismen und Prozesse angesprochen, die über das reine Zeiterleben hinausweisen. Gleichwohl ist die Dauerbeurteilung nicht mit dem Begriff von der Dauer gleichzusetzen. Der Zeitbegriff ist nicht quantifizierbar, noch bezieht er sich auf ein einzelnes, dauerndes Ereignis.

Aus diesen Überlegungen heraus wird hier ein eigenes Klassifikationsschema subjektiver Zeit vorgestellt, das drei eigenständige, aber miteinander in Wechselwirkung stehende Ebenen beinhaltet: *die Empfindung („Wahrnehmung“) des Wechselspiels zwischen Konstanz und Veränderung; die Beurteilung („Messung“) einer Dauer; schließlich der Zeitbegriff*. Je höher die Ebene, desto höher auch der Abstraktionsgrad subjektiver Zeit; je niedriger die Ebene, desto stärker ist das Zeiterleben verwoben mit der sensorischen Stimulation und der konkreten Veränderung. Jede Ebene ist mit ihrer benachbarten verbunden, sowohl von unten nach oben als auch von oben nach unten. Die basale Empfindung einer Veränderung oder Konstanz über die Zeit ist die Voraussetzung für die bewußte Beurteilung einer Dauer. Die Beurteilung einer Dauer ist die Bedingung für die Entwicklung eines Begriffes von der Zeit (Richie & Bickhard, 1988). Aber auch der Zeitbegriff selbst verkehrt sich zur Bedingung von Zeitschätzung und Zeitempfindung, wenn es gilt, eine bestimmte Dauer zu beurteilen, eine bestimmte Sukzession als solche wahrzunehmen.

Was ist nun subjektive Zeit? *Zusammenfassend soll subjektive Zeit hier verstanden werden als Abbild objektiver Zeit, d. h. als Abbild der Zeit, die von einem bestimmten Ereignis zu abstrahieren ist. Dieses Abbild entsteht auf unterschiedlichen psychischen Ebenen und kann – je nach Betrachtungsweise – entweder als (a) erfahrbares psychisches Produkt, d. h. als Wahrnehmung, Beurteilung oder Begriff, oder (b) als nicht erfahrbarer psychischer Prozeß gefaßt werden, der als Ergebnis zu einer zeitlichen Erfahrung führen kann.*

Ebenen subjektiver Zeit

Abbildung 1 zeigt ein Modell subjektiver Zeit, in dem mentale Zeitrepräsentationen drei Ebenen zugeordnet werden. Erläuterungen zu den Ebenen finden sich im Text.



Abbildung 1. Modell der Ebenen subjektiver Zeit. Der Inhalt einer jeweiligen Ebene ist durch die fettgedruckten und schattierten Begriffe gekennzeichnet. Die dahinterliegenden Kreise und die darauf gedruckten Begriffe deuten auf die Einflüsse auf den Inhalt einer Ebene hin. Auf der untersten Ebene (Ebene 1) bilden v. a. sensorische Parameter und physikalische Reizeigenschaften die Grundlage der Zeitwahrnehmung. Ebene 2 ist dagegen eher durch komplexere Reiz- und Sinneseigenschaften sowie durch kognitiv vermittelte, also psychologische Parameter beeinflusst. Schließlich sind auf Ebene 3 zunehmend gesellschaftliche Einflußfaktoren anzutreffen.

*Ebene 1:**Die Empfindung des Wechselspiels zwischen Konstanz und Veränderung.**„Wahrnehmung“ von Simultaneität, Sukzession und Dauer*

Auf dieser Ebene ist die unmittelbare Erfahrung von Zeit anzusiedeln.

Von *Simultaneität* (Parallele zum Raum: Punkt, Singularität) spricht man, wenn der Beginn oder das Ende zweier (oder mehrerer) Ereignisse zur selben Zeit stattfindet bzw. wenn diese Ereignisse nicht durch die Dimension Zeit voneinander unterschieden werden können. Physikalische Simultaneität² muß nicht zwangsläufig zu wahrgenommener Gleichzeitigkeit führen, und umgekehrt werden Ereignisse als gleichzeitig wahrgenommen, die deutlich meßbar von dieser abweichen. Bereits in sehr frühen Arbeiten der experimentellen Psychologie (Stein, 1928; zitiert nach Fraisse, 1985) konnte gezeigt werden, daß die Buchstaben eines Wortes gleichzeitig gesehen werden, wenn das Darbietungsintervall zwischen dem ersten und dem zweiten Buchstaben unter hundert Millisekunden bleibt. Lichtenstein (1961) fand heraus, daß vier Scheitelpunkte eines Vierecks auch dann noch simultan gesehen werden, wenn sie nacheinander aufleuchten, vorausgesetzt, daß die Verzögerung zwischen dem ersten und dem vierten Stimulus nicht 125 Millisekunden übersteigt. Bei welchem Wert das kritische Zeitintervall, also der Übergang vom Nacheinander zum Gleichzeitig unterschritten wird, hängt von der Modalität und dem Komplexitätsgrad der Reize ab. Das Intervall wird größer, wenn die Reizkomplexität ansteigt (Grüsser, 1998).

Sukzession (Parallele zum Raum: räumliche Folge) bezeichnet die Abfolge von Ereignissen. Die Abfolge läßt sich formallogisch als vorher, zugleich und nachher beschreiben (vgl. McTaggart, 1993). Psychologisch relevant ist die Frage nach dem Zeitintervall, in dem zwei sukzessiv dargebotene Reize nicht mehr als Einheit, sondern als zwei verschiedene Reize wahrgenommen werden. Ist das Zeitintervall zwischen den Reizen ein wenig größer, dann nehmen wir noch eine kontinuierliche Stimulation wahr, jedoch mit variierender Intensität. Phänomenologisch stellt sich dies dar als das Flimmern für den Gesichtssinn, das

² in Abgrenzung zu objektiver Simultaneität, die faktisch unmöglich ist

Rollen und Knistern für den Gehörsinn und das Vibrieren für den Tastsinn.

Die Wahrnehmungsschwelle der Sukzession hängt von den Bedingungen der sensorischen Rezeptortätigkeit ab (Fraisse, 1985). In der auditiven Modalität verschmelzen zwei sukzessive Impulse zu einem „trillerartigen“ Geräusch, wenn das zeitliche Intervall zwischen ihnen kürzer als 50-60 ms ist (Grüsser, 1998, S. 92). Beim Gesichtssinn liegt die Flimmerverschmelzungsfrequenz, die psychologische Grundlage für Film und Fernsehen, zwischen 22 Hz und 80 Hz, je nach Leuchtdichte und Reizfläche (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 328).

Die *Dauer* (Parallele zum Raum: Abstand) ist das dialektische Gegenteil und Komplement zur Veränderung. Alles, was dauert, verändert sich nicht. Je feiner hingegen der Auflösungsgrad der Betrachtung, desto eher wird man auch in der Ruhe eine, wenn auch geringfügige Veränderung beobachten können. So kann man schließen: Alles dauert und ist zugleich einer ständigen Veränderung unterworfen. Die Dauer erscheint somit nur als Abstraktion einer mannigfaltigen Veränderung zum Zwecke der besseren Überschaubarkeit. Sie ist eingebettet in den Widerspruch zwischen dem fixierten, dauernden Intervall mit seinen festgelegten Grenzen und dem Werden und Vergehen des vermeintlich Dauernden zu jedem Zeitpunkt. Folglich ist Dauer niemals absolut zu begreifen, sondern immer in Beziehung zu setzen zu dem Ereignis, das definitionsgemäß dauern soll.

Auch die wahrgenommene Dauer ist von der Beschaffenheit der Stimuli abhängig: „Dauer kann nicht unabhängig von dem, was andauert, wahrgenommen werden“ (Fraisse, 1985, S. 80).

Ebene 2:

Die Beurteilung einer Dauer.

Die zwei Perspektiven der Kompensation des Fehlens eines Sinnesorgans für Zeit

Ebene 2 beinhaltet das subjektive Messen der Dauer.

Unstrittig ist, daß die Dauer eines Ereignisses subjektiv beurteilt werden kann. Da

allerdings kein Sinnesorgan für Zeit existiert (bzw. bislang nicht nachgewiesen werden konnte), entstanden historisch im wesentlichen zwei Forschungsparadigmen zur Erklärung von Zeitschätzungen und subjektiver Zeit. Zum einen läßt sich Zeit als „Sinn“ in derselben Weise wie Sehen oder Hören begreifen; zum anderen läßt sich Zeit als Produkt einer geistigen Konstruktion verstehen.

Zeitbeurteilung als quasi-sensorischer Prozeß

Wird Zeit als Sinn betrachtet bzw. wird von der Existenz eines Zeitsinns oder – moderner ausgedrückt – von der Existenz eines temporalen sensorischen Systems (*temporal sensory system*; Treisman, 1993) ausgegangen, liegt die Einbettung der Untersuchung von psychologischer Zeit in das Paradigma psychophysischer Modelle und Methoden nahe. Beispielsweise hat Mach vor etwa 140 Jahren bereits versucht, das Webergesetz auf die Zeit anzuwenden (s. Boring, 1942). Vierordt (1868) beobachtete, daß kleine Zeitintervalle in der Regel überschätzt, während große Zeitintervalle meist unterschätzt werden. Dieser auch in späteren Untersuchungen bestätigte Zusammenhang ging unter dem Namen des *Vierordt-schen Gesetzes* in die Fachliteratur ein.

Das Fehlen eines identifizierten Sinnesorgans für die Zeit führte zu der Frage, *was* genau im Rahmen von Zeitwahrnehmung wahrgenommen werde, und ferner, *auf welche Weise* dies geschehe. Entsprechend dem psychophysischen und dem experimental-psychologischen Ansatz sollte dem „Was“ ein Reiz und dem „Wie“ ein Rezeptor zugeordnet werden, mit dessen Hilfe der Reiz in den Prozeß der Reizverarbeitung eintritt. Zeit an sich ist jedoch kein adäquater Reiz³.

There is no environmental or neural event that uniquely and uniformly covaries with time from an arbitrary stimulus and, hence, no possibility that natural selection could have produced a neural system for its detection. (Donahoe & Burgos, 1999; Hervorhebung im Original, d. Verf.)

³ Von einem adäquaten Reiz spricht man, wenn auf diesen ein Sinnesorgan optimal reagiert (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 310). Für das Auge sind dies elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge zwischen 400 nm und 800 nm, für das Ohr Schallwellen mit einer Frequenz zwischen 20 Hz und 16000 Hz.

Während bei optischen und akustischen Reizen der adäquate Reiz physikalisch bestimmt wird, mußte der „Zeitstimulus“ anders als z. B. innerhalb der visuellen oder auditiven Wahrnehmung konzeptualisiert werden und wurde stattdessen als *innere Aktivität des Nervensystems* betrachtet. Das Ausmaß dieser Aktivität konnte nun variieren und war damit weiteren mentalen Verarbeitungsschritten zugänglich. Der „Zeitrezeptor“ wurde aufgefaßt als eine Art Aufzeichnungsmechanismus dieser inneren Aktivität (z. B. Eisler, 1975). Je mehr Aktivität aufgezeichnet wird, desto länger ist die empfundene Dauer. Im Ergebnis führten diese Konzeptionen dazu, daß die Verarbeitung zeitlicher Informationen auf ein System zurückgeführt wurde, das von anderen Wahrnehmungssystemen weitgehend unabhängig und eigenständig arbeitet, obgleich moderierende Einflüsse sensorischer Stimulationen durchaus nicht ausgeschlossen wurden. Die Metapher, die dieses System am treffendsten beschreibt, ist die der *inneren Uhr*. Bereits 1933 schlug Hoagland ein biologisches Modell der inneren Uhr vor, das als Grundlage der Zeitwahrnehmung neuronale Schrittmacherzellen (*neural pacemaker cells*) vorsah.

Ein so konzipiertes Zeit-Abbildungssystem muß mindestens zwei Kriterien genügen, um objektive Zeit adäquat erfassen zu können: Es muß *valide* sein in dem Sinne, daß es wirklich Zeit erfaßt und nichts anderes, und es muß *reliabel* sein, d. h. die Zeit möglichst genau abbilden. Die Operationalisierung der Reliabilität entspricht der Forderung an das System, innerhalb einer Serie von Versuchsdurchgängen Werte subjektiver Zeit zu produzieren, die ihrer zentralen Tendenz nach der objektiven Zeit entsprechen und darüber hinaus eine möglichst geringe Variabilität aufweisen. Valide ist das System dann, wenn die Werte subjektiver Zeit in möglichst geringem Maße von anderen Faktoren als der objektiven Zeit selbst beeinflußt werden. In diesem Sinn ist eine valide Zeitschätzung dann gegeben, wenn nichtzeitliche Faktoren wie z. B. die Modalität oder die Intensität eines Reizes zu keiner systematischen Verzerrung führen.

Der Anspruch auf Validität und Reliabilität eines Zeitabbildungssystems ging einher mit der frühen Orientierung zeit-psychologischer Forschung an psychophysischen Gesetzen. Eine klassische Fragestellung der Psychophysik ist die nach dem Verhältnis zwischen

der physikalischen Merkmalsausprägung eines Reizes und deren subjektiver Beurteilung. Der Leitgedanke einer psychophysischen Untersuchung ist es ja gerade, das subjektive Urteil als Funktion der objektiv gegebenen, physikalischen Größe des Stimulus abbilden zu können. Solche Funktionen werden psychophysische Funktionen genannt, in denen üblicherweise logarithmische (Fechner, 1860) oder exponentielle Beziehungen (Stevens, 1975) zwischen Stimulus und subjektivem Urteil angenommen werden. Allan (1979) berichtet einen exponentiellen Zusammenhang zwischen subjektiver und objektiver Zeit mit einem von eins unwesentlich verschiedenen Exponenten, Stevens (1957) bestimmte einen Exponenten von 1.1, Eisler (1976) einen Exponenten von 0.9.

Während in der Bestimmung der psychophysischen Funktion der Grad an Übereinstimmung zwischen psychologischer bzw. subjektiver und physikalischer (bzw. objektiver) Zeit zum Ausdruck kommt, stellt die Übertragung des Weberschen Gesetzes auf die Zeitwahrnehmung vor allem die Variabilität von Zeitschätzungen in den Vordergrund. Denn ein wesentlicher Unterschied zwischen einer biologisch-psychologischen Uhr und ihrem technischen Leitbild ist der Umstand, daß psychologische Zeitmessungen mit wachsender Dauer zunehmend ungenau werden, also deutlich an Reliabilität einbüßen. „Die Präzision wahrgenommener Dauer schwindet unaufhaltsam mit der Länge des Zeitintervalls“ (Geißler, 2000, S. 135). In seiner einfachen Form behauptet das Webergesetz (bezogen auf die subjektive Dauer) eine konstante Relation zwischen dem ebenmerklichen Unterschied (*just noticeable difference*; Δs) zwischen zwei Stimulusdauern und der jeweiligen kürzeren Stimulusdauer s ($\Delta s/s = \text{const.}$). Üblicherweise wird Δs operationalisiert als die Standardabweichung (SD) einer Verteilung von Werten von Intervallschätzungen (vgl. Allan, 1979; Getty, 1975). Daraus folgt, daß bei Gültigkeit des Weberschen Gesetzes für die Schätzung von Intervallen die Standardabweichung der Verteilung proportional zum Mittelwert der Schätzung sein sollte (Allan, 1979).

Abweichungen vom Webergesetz in bezug auf Zeitschätzungen sind verschiedentlich gefunden worden. Doehring (1961) fand, daß die Standardabweichung der Verteilung von Dauerbeurteilungen zwar monoton, nicht aber proportional zum Mittelwert anstieg (vgl.

auch Abel, 1972a, b; Creelman, 1962). Thomas und Brown (1974) berichteten innerhalb von Reproduktionsaufgaben größere Standardabweichungen bei längeren Intervallen (4500 ms bis 5500 ms) als bei kürzeren Intervallen (750 ms bis 1750 ms). Die Daten von Getty (1975) lassen sich hingegen gut mit einer (erweiterten) Form des Webergesetzes vereinbaren (s. Getty, 1975, p. 2). In seinem Experiment blieb die ermittelte Weberkonstante zwischen 200 ms und 2000 ms invariant.

Innerhalb von Uhrmodellen wird die durch das Webergesetz beschriebene Variabilität von Zeitschätzungen zum Teil Gedächtnis- und Entscheidungsprozessen zugeschrieben (z. B. Gibbon, 1991; Gibbon & Church, 1984).

Zeitbeurteilung als kognitive Konstruktion.

Zwei Aspekte weisen auf einen Mangel an Erklärungspotenz psychologischer Uhrmodelle hin: (1) das Fehlen eines physiologischen Korrelats der inneren Uhr; (2) die Unfähigkeit der Modelle, multiple, die Zeiterfahrung beeinflussende Faktoren in vollem Umfang zu berücksichtigen. Dies führte zu Ideen und Modellen, in denen Zeit nicht durch einen konkreten Mechanismus abgebildet wird, sondern das bewußte Produkt eines komplexen Informationsverarbeitungsprozesses darstellt. Einer der bedeutendsten Vertreter dieser Sichtweise ist der niederländische Psychologe John A. Michon.

Time is a conscious experiential product of the processes which allow the (human) organism to adaptively organize itself so that its behavior remains tuned to the sequential (order) relations in its environment. (Michon, 1985a, p. 20)

Nach Michon ist Zeit also allein ein psychologisches Phänomen. Diese Sichtweise gründet sich u. a. auf die Negation objektiver Zeit durch den französischen Philosophen Jean-Marie Guyau, der Zeit als bloße Organisation mentaler Repräsentationen verstanden wissen wollte.

From everything we have seen thus far, we may conclude that time is not a condition, but rather a simple product of consciousness, it derives from it. Time is not an a priori form which we impose on phenomena, it is a set of relationships that ex-

perience establishes among them. Time (...) is (...) nothing but a kind of systematic tendency, an organization of mental representations. (Guyau, 1890/1988, p. 145)

Die physikalische Realität habe wenig anzubieten, das als zeitlicher Stimulus angesehen werden könne (vgl. Davies, 1981; Michon, 1985a).

Apparently we must acknowledge that much of the rich phenomenology of experiential time is largely in the eye-and the mind/brain-of the beholder, not out there: time is essentially a psychological problem. (Michon, 1992, p. 303)

Psychologische Zeitmessung, d. h. die Bestimmung einer Dauer, ist in einigen Punkten ähnlich wie bei Modellen der inneren Uhr konzipiert, allerdings mit einigen wesentlichen Ausnahmen. Wie bei der inneren Uhr wird angenommen, daß eine externe Ereignisfolge (beim Uhrmodell die physikalische Zeit) zu einer von dieser unabhängigen internen Ereignisfolge (beim Uhrmodell Impulse) in Relation gesetzt wird. Subjektive Dauer entspricht dabei der Anzahl von internen Ereignissen zwischen zwei bestimmten Bezugsereignissen (beim Uhrmodell der Anzahl akkumulierter Impulse). Mindestens drei grundsätzliche Unterschiede zum Uhrmodell lassen sich jedoch ausmachen. Erstens ist die interne Ereignisfolge nicht als Produkt eines quasi-mechanischen Apparates gedacht, sondern besteht aus nicht näher spezifizierten mentalen Ereignissen. Zweitens werden die internen Ereignisse nicht mit einer bestimmten, relativ konstanten Frequenz produziert und können folglich kein reliables Maß für objektive resp. physikalische Zeit bilden. Drittens ist die Beziehung zwischen Maß und Gemessenem uneindeutig. Während bei den Uhrmodellen subjektive Zeit (wie auch immer sie letztlich konzipiert ist) das Maß und physikalische Zeit das Gemessene ist, findet man in kognitivistischen Ansätzen die Möglichkeit der Umkehrung dieses Verhältnisses: Gemessen werden können sowohl die Anzahl der externen als auch die Anzahl der internen Ereignisse, entsprechend wechseln auch das jeweilige Maß und Gemessene.

Using one of the event series as a reference, the interval between the events p and q can be expressed in terms of the number or density of events between p' and q' or vice versa. (Michon, 1985, p. 29; Hervorhebung im Original, d. Verf.)

Ebene 3: Der Zeitbegriff

Der Zeitbegriff ist untrennbar verbunden mit bewußter Informationsverarbeitung, mit reflektierendem Denken. Er spiegelt die höchste und abstrakteste Stufe subjektiver Zeit wider. Was wir „Zeit“ nennen, ist eine Integration verschiedener Zeiterfahrungen, im wesentlichen die der Sukzession und der Dauer (Fraisie, 1985). Zeit kann nicht als „leere“ Zeit, ohne Bezug zu materiellen Prozessen, gedacht werden. Deshalb ist jeder Begriff von Zeit mehr oder weniger metaphorisch und gegenständlich (vgl. Jackson & Michon, 1992).

Zu den häufigsten Metaphern der Zeit zählt zweifelsfrei die *Verräumlichung* von Zeit (Fraisie, 1985; Michon, 1985b, 1992). Auch innerhalb der Physik ist verräumlichte Zeit gegenwärtig und vorherrschend (Blaser, 1998; Park, 1985). Der Raummetapher entsprechen die folgenden der Zeit zugeordneten Eigenschaften: (1) die *fließende* Zeit: Zeit gilt als etwas Dynamisches, Veränderliches, nie zur Ruhe Kommendes; (2) die *kontinuierliche* Zeit: zwischen zwei willkürlich gewählten Zeitpunkten liegen unendlich viele andere Zeitpunkte; (3) die *metrische* Zeit: Zeit kann durch Zahlen dargestellt und folglich gemessen werden (Szamosi, 1992).

Gewöhnlich wird Zeit als eine richtungsweisende Linie („Zeitpfeil“) dargestellt, auf die Annahme verweisend, daß Zeit eine unumkehrbare Richtung aufweist. Die Richtung der Zeit kann, je nach Perspektive des Betrachters, unterschiedlich dargestellt werden. Entweder wird das Zeitkontinuum (Vergangenheit-Zukunft-Kontinuum) als ruhend betrachtet, auf welchem sich die Gegenwart in eine festgelegte Richtung verschiebt (Abbildung 2, oben); oder die Gegenwart wird als stationär angenommen, was eine Bewegung des Zeitpfeils selbst durch die Gegenwart hindurch in die entgegengesetzte Richtung zur Folge hat (Abbildung 2, unten).

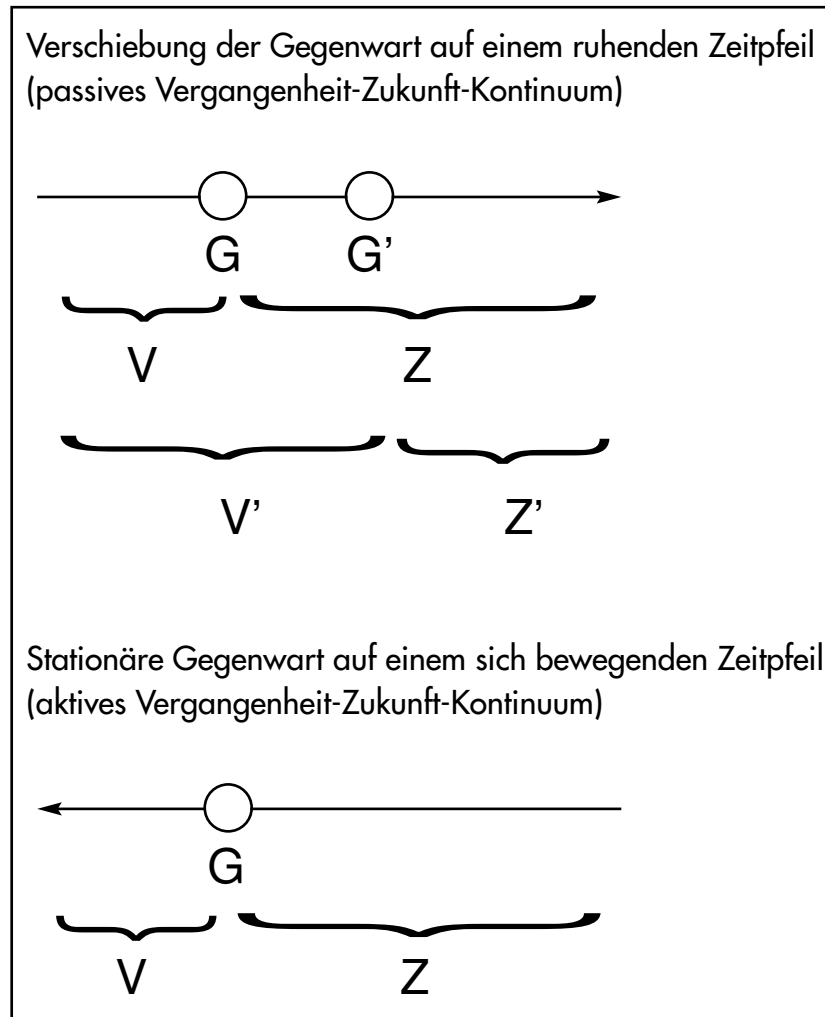


Abbildung 2. Zwei Formen des richtungsbezogenen Zeitkontinuums. G bzw. G' entspricht der Gegenwart bzw. der verschobenen Gegenwart; V entspricht der Vergangenheit, V' der um die Verschiebung von G nach G' „erweiterten“ Vergangenheit; Z entspricht der Zukunft, Z' der um die Verschiebung von G nach G' „verminderten“ Zukunft.

Für die Art, wie Zeit, insbesondere die Dauer, begrifflich abgebildet wird, hat Montanero (1985) ein Modell entwickelt. Nach diesem hat die Dauer unterschiedliche Bedeutungen und wird entsprechend dieser Bedeutungen begriffen: (1) Die Dauer ist zunächst definiert durch ihre zeitliche Erstreckung und durch die Reihenfolge der sie determinierenden Ereignisse. (2) Die Dauer korrespondiert mit der Geschwindigkeit des dauernden Ereignisses sowie mit der räumlichen Distanz, die ein Objekt innerhalb der Dauer zurücklegt. (3) Die Dauer steht in einem engen Verhältnis zu diskreten Aktivitäten, die während dieser stattfinden; insofern kann die Dauer bezogen werden auf die Frequenz dieser Aktivitäten bzw.

auf die Anzahl der in ihr stattfindenden Aktivitäten.

Jeder Zeitbegriff ist ein Produkt des Menschen in Wechselwirkung mit seiner Umwelt und deshalb immer auch abhängig von einer bestimmten gesellschaftlichen Epoche. So ist auch der metrische Zeitbegriff erst mit Aufkommen der industriellen Produktionsweise entstanden (Szamosi, 1992). Dieser Produktionsweise und der mit ihr verbundenen gesellschaftlichen Denkweisen geschuldet scheint auch die *Mystifizierung der Zeit* zu sein. Diese beinhaltet (a) die *Vergegenständlichung* von Zeit: Zeit scheint manipulierbar zu sein („Umgang mit Zeit“; Plattner, 1990, S. 52 ff.). Der Gegenständlichkeitscharakter wird ferner deutlich durch Begriffe wie: Zeitorganisation (Götz & Lackner, 1996), Zeitmanagement (Seiwert, 1995) und Zeitkompetenz (Freericks, 1996); (b) die *Personifizierung von Zeit*: Zeit erwacht zu einem scheinbaren Eigenleben („Herrschaft von Zeit“, „Getriebenwerden durch die Zeit“); und (3) die *Individualisierung von Zeit*: Jeder scheint seine eigene Zeit zu haben („Eigenzeit“, „soziale Zeit“, „individuelle Zeit“). Die Mystifizierung von Zeit verleiht dem Zeitbegriff besondere Merkmale. Zum einen ist der so konstruierte Begriff nicht in der Lage, ein allgemeines Zeit-Phänomen zu beschreiben, da die Bedeutung der Zeit in Abhängigkeit von denjenigen Faktoren, die den durch den Zeitbegriff symbolisierten Inhalt bedingen, variieren kann. Zum anderen können Personifizierung und Gegenständlichkeitscharakter der Zeit zu der Vorstellung führen, daß Zeit lösgelöst von den materiellen Prozessen manipuliert werden könne („Zeit als Objekt menschlichen Handelns“; Plattner, 1990, S. 53 f.).

Das Forschungsinteresse in dieser Studie richtet sich allein auf die mittlere Ebene subjektiver Zeit („Messung“ von Zeit). Nachfolgend werden psychologische Modelle vorgestellt, die Beurteilungen von Zeitintervallen erklären sollen. Der Schwerpunkt der Darstellung liegt bei Modellen, die in der ein oder anderen Form die Hypothese einer inneren Uhr beinhalten. Diese Auswahl begründet sich zum einen dadurch, daß in der Fachliteratur Uhrmodelle bei weitem am häufigsten anzutreffenden sind und somit von den meisten in diesem Bereich arbeitenden Forschern verwendet werden. Zum anderen sind diese Modelle in der Lage, Zeitintervalle und deren subjektive Beurteilungen in ein quantitatives Verhältnis

zu setzen und damit – bei bestimmten gegebenen Parametern – präzise Vorhersagen über die subjektive Schätzung eines Intervalls treffen zu können.

Die Intervalle, deren Beurteilung hier betrachtet wird, liegen im Bereich einiger hundert Millisekunden. Dies hat vor allem zwei Gründe: Einerseits ist das die Schätzung unterstützende und damit auf diese verzerrend wirkende Zählen innerhalb kurzer Intervalle eher unwahrscheinlich; andererseits führen kurze Intervalle im allgemeinen auch zu kürzeren Experimenten, wodurch die Belastung der teilnehmenden Versuchspersonen reduziert werden kann.

Quantitative Theorien psychologischer Zeit

Schrittmacher-Akkumulator-Systeme

Seit den 60er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts sind eine Reihe von quantitativen Modellen der Dauerdiskrimination entstanden. Diese Theorien sind typische psychophysische Theorien. Sie postulieren einen Inputprozeß, einen Entscheidungsprozeß und einen Antwortprozeß. Durch den Inputprozeß wird das zeitliche Ausmaß eines Reizes aufgezeichnet und anschließend mit einem im Gedächtnis repräsentierten internen Standard verglichen; schließlich erfolgt die Antwort (Allan & Kristofferson, 1974, p. 26). Man kann die für den Zeitbeurteilungsprozeß notwendigen Komponenten auch als (a) Repräsentation physikalischer Zeit, (b) einem Gedächtnis für Zeit und (c) einer Entscheidungs- bzw. Verhaltensregel (Church, 1999, p. 255) bezeichnen. Gemeinsam ist allen psychophysischen Theorien die Annahme, daß die Diskriminierung der Dauer eines Stimulus wesentlich von dessen tatsächlicher zeitlicher Ausdehnung bestimmt ist. Ziel dieser Theorien ist es, Verhalten zu beschreiben und zu erklären, welches ein Urteil über Stimuli voraussetzt, die sich hinsichtlich ihres zeitlichen Ausmaßes unterscheiden (Allan & Kristofferson, 1974, p. 30), oder, anders ausgedrückt, Änderungen von Verhalten zu erklären, die in Abwesenheit von korrespondierenden Veränderungen in der äußeren Umwelt stattfinden (Donahoe & Burgos, 1999, p. 257). Die meisten und am häufigsten zitierten quantitativen Theorien psychologischer Zeit anerkennen die Hypothese einer oszillierenden inneren Uhr, die physikalische Zeit in subjektive Zeit transformiert. Ausnahmen bilden sog. Zeit-Konditionierungsmodelle (*real-time conditioning models*): So nehmen Sutton und Barto (1981) sowie Moore und Choi (1998) statt eines Oszillators Gedächtnisspuren (*stimulus traces*) als Repräsentanten physikalischer Zeit an; Staddon und Higa (1999) verstehen subjektive Zeit als das Ergebnis von Habituationsprozessen.

Die Modelle von Creelman und Treisman

Creelman (1962) und Treisman (1963) entwickelten erste quantitative Modelle der Dauer-Diskriminierung. In diesen Modellen wird ein Mechanismus vorgeschlagen, der die Übersetzung physikalischer Zeit in eine psycho-biologische Form ermöglicht. Ein Schrittmacher (*pacemaker*) „feuert“ mit bestimmter Wahrscheinlichkeit Impulse ab, die während der Darbietung eines Stimulus aufsummiert bzw. akkumuliert werden. Je länger das zu beurteilende Zeitintervall, desto mehr Impulse werden akkumuliert, desto länger andauernd wird das betreffende Intervall erfahren. Als Quelle der Impulse betrachten sowohl Creelman als auch Treisman eine große Anzahl von einzelnen, voneinander unabhängigen oszillierenden Elementen. Der Schrittmacher ist also konzeptionell weniger ein psychologischer, sondern mehr ein biologischer Mechanismus. Oder, wie Killeen formuliert: “The pacemaker is an oscillator, as is anything that rotates or revolves or swings – anything, that is, that can be modeled as an oscillator” (Killeen, 1999, p. 277).

Da empirische Zeitschätzungen hinsichtlich des zu beurteilenden Zeitintervalls Schwankungen unterliegen, ist ein wichtiger theoretischer Aspekt die Frage nach der Genauigkeit (Reliabilität) der inneren Uhr. In Creelmans Modell wird keine deterministische Abfolge von Impulsen bei Vorliegen eines externen Stimulus angenommen, sondern statt dessen ein probabilistisches Verhältnis zwischen der Präsenz eines Stimulus und der Impulsaussendung. Creelman (1962) schlug als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Impulse die Poissonverteilung vor, deren Erwartungswert und Varianz proportional zu dem zu beurteilenden Zeitintervall sein sollten.

Im Gegensatz zu Creelman nahm Treisman (1963) einen deterministischen Schrittmacher mit annähernd konstanten Interimpuls-Intervallen an. Die Frequenz des Schrittmachers kann in Abhängigkeit von externen Einflüssen variieren. Ein Zählwerk (*counter*) zeichnet die Anzahl emittierter Impulse auf. In späteren Arbeiten spezifizieren Treisman und Mitarbeiter (Treisman & Brogan, 1992; Treisman, Cook, Naish & MacCrone, 1994; Treisman, Faulkner, Naish & Brogan, 1990) ihr Modell der inneren Uhr. Sie werfen die Frage auf,

ob ein einziger Schrittmacher ausreicht, um z. B. die Unterschiede zwischen dem zeitlichen Abbild (*time perception*) und der zeitlichen Steuerung (*temporal performance*) erklären zu können (Treisman & Brogan, 1992). So bemerken sie:

If one listens to music that is well or poorly played, the time may seem to fly past or to drag, but corresponding illusory variations in the tempo at which the music is played do not seem to occur. If subjects repeatedly reproduce a standard time interval during a session, their reproductions can lengthen significantly, but during the same period simple reaction times may show no such change. (p. 44)

Treisman und Brogan (1992) sowie Treisman et al. (1990, 1994) schlagen vor, daß Schrittmacher auf unterschiedlichen Ebenen innerhalb einer motorischen Kontrollhierarchie bzw. innerhalb paralleler Hierarchien vervielfältigt werden, so daß das motorische Timing abhängig von diesen verteilten Schrittmachern ist. Die Koordinierung unterschiedlicher Aktivitäten zur selben Zeit erfordert eine stabile, gemeinsame Frequenz aller beteiligten Schrittmacher. Allerdings resultiert daraus die Schwierigkeit, auf unteren Ebenen einzelne Modifikationen bzgl. der Geschwindigkeit der Effektoren durchzuführen. Deshalb wird angenommen, daß das verteilte Schrittmachersystem sowohl eine stabile Bezugsfrequenz aufweist als auch die Möglichkeit der flexiblen Adjustierung bietet.

Das Modell in Abbildung 3 zeigt eine mögliche Lösung des Problems (nach Treisman et al., 1990).

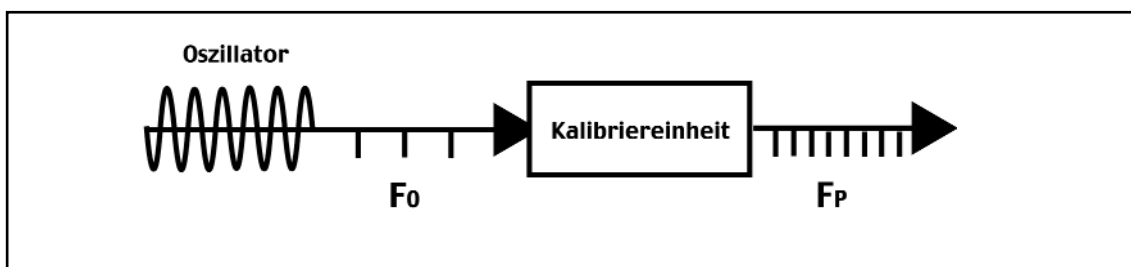


Abbildung 3. Modell des Schrittmachers nach Treisman et al. (1990). Erläuterungen im Text.

Der Schrittmacher besteht aus zwei Komponenten: Die erste Komponente ist ein Oszillator (*temporal oscillator*), der Impulse mit regelmäßiger Frequenz (F_0) aussendet. Die zweite Komponente ist eine Kalibriereinheit (*calibration unit*), deren Input die Impulse des Oszillators sind. Sie wandelt die Frequenz des Oszillators in eine eigene Frequenz (F_P) um.

Im einfachsten Fall multipliziert die Kalibriereinheit die Ausgangsfrequenz mit einem bestimmten Faktor. Das Output der Kalibriereinheit wird anschließend in einem Informationsverarbeitungssystem weiterverarbeitet. Sensorische Signale können die Frequenz der Kalibriereinheit, nicht aber die des Oszillators manipulieren.

Die Geschwindigkeit der inneren Uhr

Die Geschwindigkeit der inneren Uhr, d. h. die Frequenz der Impulsproduktion des Schrittmachers, wird allgemein als veränderbar betrachtet. Bereits Hoagland (1933) behauptete, daß die Frequenz der inneren Uhr abhängig sei von der Körpertemperatur: je höher die Temperatur, desto schneller arbeite die innere Uhr. In einem Experiment von Lockhart (1967) hingegen unterschätzten Versuchspersonen, die für eine Stunde einer Temperatur von 43.3°C ausgesetzt waren, Zeitintervalle in einer Produktionsaufgabe ebenso wie Versuchspersonen, die eine Stunde bei einer Temperatur von 4.4°C verbracht hatten. Die Unterschätzung von Zeitintervallen wurde interpretiert als Beschleunigung der inneren Uhr, die sowohl bei Erhöhung als auch bei Verminderung der Körpertemperatur erfolgte.

Treisman et al. (1990) boten Versuchspersonen während eines zu beurteilenden Zeitintervalls Klickgeräusche dar und fanden, daß die zusätzliche Präsentation der Klickgeräusche zu einer verbalen Überschätzung der Dauer dargebotener Stimuli führte. Ein ähnlicher Effekt zeigte sich bei Darbietung kurzzeitiger Lichtimpulse während eines Zeitintervalls (Treisman & Brogan, 1992). Penton-Voak, Edwards, Percival und Wearden (1996) ließen Versuchspersonen Zeitintervalle mit verschiedenen Methoden (*temporal generalization*, Paarvergleich, verbale Schätzungen und Produktionsaufgabe; vgl. Appendix 1) beurteilen, denen eine Serie von Klickgeräuschen (5 bzw. 25 Hz) vorausging. Mit allen Methoden konnte gezeigt werden, daß sich die geschätzte Länge der Intervalle systematisch veränderte, was – übertragen auf den internen Schrittmacher – mit dessen Beschleunigung um durchschnittlich 10% korrespondierte. Auch die Verabreichung von pharmakologischen Substanzen verändert die Geschwindigkeit der inneren Uhr (vgl. Hinton & Meck, 1997). Maricq, Roberts und Church

(1981) beobachteten in einem *peak interval procedure*-Experiment mit Ratten (vgl. Appendix 1) eine proportionale Verschiebung der maximalen Antworthäufigkeit (*peak time*) auf einen früheren Zeitpunkt, wenn den Versuchstieren zuvor der Dopamin-Agonist Methamphetamin (ein antriebssteigerndes Psychostimulans; vgl. Pöldinger, 1971) verabreicht wurde. Die Verschiebung der Antworthäufigkeit kann als Resultat der Beschleunigung der inneren Uhr interpretiert werden. Andererseits vermögen Dopamin-Antagonisten wie z. B. Haloperidol die Geschwindigkeit der inneren Uhr zu drosseln (Meck, 1983, 1996).

Meck, Church und Gibbon (1985) trainierten Ratten in einer Bisektionsaufgabe (vgl. Appendix 1), nach Darbietung eines einsekündigen Reizes einen bestimmten Hebel, nach Darbietung eines zweisekündigen Reizes einen anderen Hebel zu betätigen. In einer anschließenden Phase des Experiments sollten die Tiere statt der Intervalle unterschiedlich segmentierte Reize diskriminieren. Diese unterschieden sich hinsichtlich der Anzahl der Segmente (von fünf bis zehn), wobei die Dauer der Reize kontrolliert wurde. Die Tiere verhielten sich zu den gering segmentierten Reizen genau so wie zu dem kurzen Intervall (1 s) und zu den stark segmentierten Reizen wie zu dem langen Intervall (2 s). Die Autoren zogen den Schluß, daß fünf Segmente einer Dauer von einer Sekunde äquivalent seien und damit eine Äquivalenz zwischen einer Zeiteinheit und einem diskreten, zählbaren Ereignis bestehe. Übertragen auf die Hypothese einer inneren Uhr würden die zählbaren Ereignisse den Impulsen eines Schrittmachers entsprechen, der alle 200 ms einen Impuls aussendet.

Treisman et al. (1990) versuchten, die Geschwindigkeit der inneren Uhr, d. h. die Frequenz der Impulsproduktion des Schrittmachers, zu ermitteln. Sie ließen Versuchspersonen die Dauer dargebotener visueller Stimuli (die zwischen 500 ms und 1100 ms lag) verbal schätzen. Gleichzeitig mit dem visuellen Stimulus wurde den Versuchspersonen eine Serie von Klickgeräuschen mit fixer Frequenz (zwischen 2.5 Hz und 27.5 Hz) präsentiert. Die Autoren stellten fest, daß bei bestimmten Klickfrequenzen die verbalen Schätzungen von einem allgemeinen Trend, nämlich der tendenziellen Überschätzung dargebotener Intervalle mit zunehmender Klickfrequenz, abwichen. Aufgrund ihrer Daten und unter Zuhilfenahme von Computersimulationen bestimmten Treisman et al. eine Grundfrequenz des Schrittmachers.

chers, die etwa ein Vielfaches der Frequenz von 12.4 Hz betrug (24.75 Hz, 37.30 Hz oder 49.50 Hz). Bei einer Grundfrequenz von 12.4 Hz würde der Schrittmacher durchschnittlich alle 80 ms einen Impuls aussenden.

Zeitquantenmodelle

Zeitverarbeitungsprozesse können nicht nur als kontinuierlicher Prozeß, sondern auch als Abfolge diskreter Informationspakete (Quanten) betrachtet werden. Kristofferson und Mitarbeiter (Allan, Kristofferson & Wiens, 1971; Carbotte & Kristofferson, 1973; Kristofferson, 1967, 1977, 1980) formulierten ein Modell, in dem ein Zeitprozeß postuliert wird, der, ähnlich dem Creelmanschen Modell, objektive Zeit als Abfolge von „Zeitpunkten“ (*time points*) abbildet, die mit konstanter Rate, d. h. alle q ms, generiert werden. Angenommen wird, daß die interne Dauer über das Zählen der Zeitpunkte gebildet wird. Das Besondere an diesem Modell ist die Annahme, daß die subjektive Dauer aus Zeitquanten besteht, d. h. nur in Vielfachen eines Basisquantums (12.5 ms) existiert. Die Größe der Zeitquanten variiert intraindividuell nur wenig und bleibt innerhalb eines Individuums konstant. Der gequantelte Zeitprozeß determiniert nicht nur subjektive Zeitschätzungen, sondern kontrolliert auch den Informationsfluß innerhalb des gesamten Informationsverarbeitungssystems, indem er die Zeitpunkte festlegt, an denen Informationen weitergeleitet werden können (Kristofferson, 1990, p. 270).

Geißler (1987, 1992, 1995, 2000) entwickelte auf der Basis bisheriger Arbeiten zur quantalen Struktur psychologischer Zeit (Allport, 1968; Kristofferson, 1967; McReynolds, 1953, Stroud, 1955) ein Zeitquantenmodell (*Time-Quantum Model, TQM*), in dem, ausgehend von in diversen Untersuchungen gefundenen empirischen Periodizitäten (z. B. Kristofferson, 1980, 1990; Latour, 1967; Sternberg, 1966, 1969; Vanagas, Balkelite, Batusyavitchus & Kiryalis, 1976), als unterste Grenze der gequantelten Zeitverarbeitung ein Intervall von etwa 4.5 ms angenommen wird. Jedes größere psychische Intervall muß ein Vielfaches dieser Basisgröße sein. Dieses Basisintervall begrenzt auch die maximale Diskriminierbarkeit dargebotener Zeitintervalle.

Die scalar timing theory

Eine der zur Zeit bedeutendsten Dauer-Diskriminations-Theorien ist das von Gibbon (1977) begründete *model of scalar timing* und später maßgeblich von ihm, Church und Meck (Gibbon, 1991; Gibbon, Church & Meck, 1984) weiterentwickelte Informationsverarbeitungsmodell *scalar timing theory* (bzw. *scalar expectancy theory*). Diese Theorie hat ihre empirischen Wurzeln in der tierpsychologischen Forschung, ihre beiden wesentlichen Annahmen gründen sich auf Konditionierungsexperimente. Beziehungen zwischen Verhaltenshäufigkeiten und der Dauer externer Ereignisse dienen als Grundlage für die Annahme der Existenz einer inneren Uhr (Donahoe & Burgos, 1999, p. 257). Theoretisch wurde sie vor allem durch das Treismansche Modell (Treisman, 1963) inspiriert, in dem bereits die wesentlichen Bausteine eines Zeitverarbeitungsmodells (Schrittmacher-Akkumulator-System, Gedächtnis und Vergleichsmechanismus) enthalten sind.

Wegweisend für die Entwicklung der Theorie war ein Experiment von Dews (1970), bei dem Tauben jedesmal dann durch Futtergabe verstärkt wurden, wenn sie das erste Mal nach einem fixen Zeitintervall eine bestimmte Reaktion ausgeführt hatten. Dews variierte die Verstärkungsintervalle innerhalb einer Spanne von 30 Sekunden bis 50 Minuten. Die Häufigkeit des erwünschten Verhaltens nahm zu, je näher der Zeitpunkt der zu erwartenden Verstärkung rückte, und erreichte kurz vor Beginn der Verstärkung das Maximum. Relativiert man distinkte Zeitpunkte (t_n) innerhalb des jeweiligen Verstärkungsintervalls (T) an dessen Gesamtdauer (t_n / T), fällt die Verteilung der Häufigkeiten des Verhaltens der Tauben für jedes Verstärkungsintervall annähernd gleich aus (siehe Abbildung 4 auf der nächsten Seite).

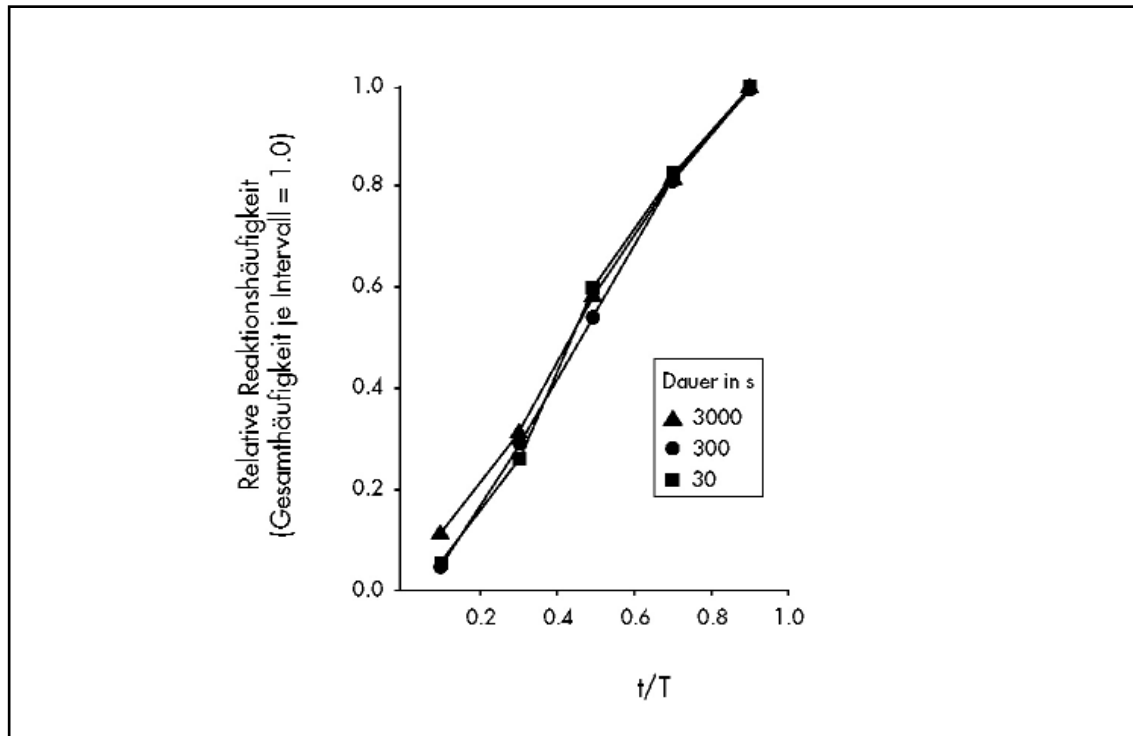


Abbildung 4. Relative Reaktionshäufigkeiten als eine Funktion relativer Zeit bei verschiedenen zu schätzenden Intervallen (nach Dews, 1970).

Diese als *Superposition* beschriebene Übereinstimmung der Kurvenverläufe spiegelt eine für die Entwicklung der *scalar timing theory* wesentliche Invarianz im Verhalten der Tiere wider: Unabhängig davon, welches Ausmaß (Dauer) das Verstärkungsintervall hatte, zeichnete sich immer der gleiche Verlauf der Kurve ab. Dieses später als skalare Eigenschaft (*scalar property*) bezeichnete Kennzeichen von Verhalten, welches das Resultat eines zeitabhängigen Verstärkungsplanes war, wurde zu einem wesentlichen Merkmal der *scalar timing theory*.

Ein weiteres theoretisches Standbein der Theorie führt zurück auf ein Experiment von Catania (1970). In einem Konditionierungsexperiment wurden Tauben verstärkt, wenn ihre Verhaltensverzögerung ein bestimmtes Kriterium überschritt. In einigen Versuchsdurchgängen wurde das Zeitkriterium variiert. Catania bemerkte einen Zusammenhang zwischen der Verzögerung und der zeitlichen Präzision des Verhaltens: Je länger das Verhalten verzögert wurde, desto größer streuten ihre Reaktionen um den kritischen Zeitpunkt. Catania

entdeckte in diesem Zusammenhang eine einfache Invarianz: das Verhältnis zwischen der mittleren Verzögerung und der Streuung der Reaktionen um das Kriterium blieb konstant ($M/SD = \text{const.}$). Das bedeutet, daß die Streuung der Reaktionen proportional mit der Dauer der Verzögerung zunahm, das zeitbeurteilende Verhalten also mit zunehmender Verzögerung ungenauer wurde (siehe Abbildung 5).

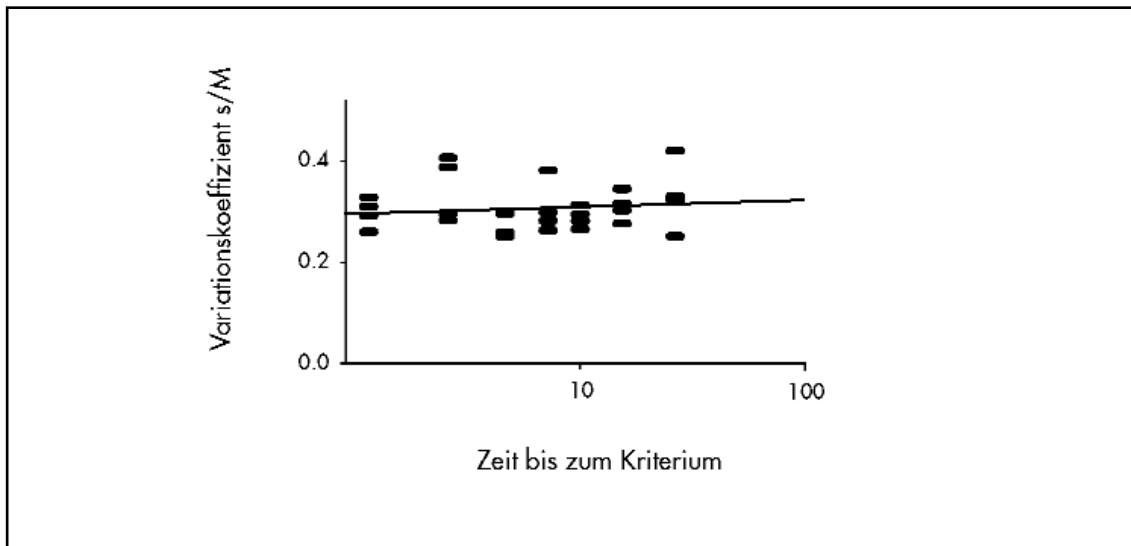


Abbildung 5. Variabilitätskoeffizient zeitabhängiger Reaktionen bei unterschiedlichen Kriteriumszeiten (nach Catania, 1970).

Die Relation zwischen Mittelwert und Streuung der Reaktionen ist der Form und dem Inhalt nach eine Verwandte des Weberschen Gesetzes und kann somit auf die Beurteilung von Reizgrößen übertragen werden: Die Zunahme einer Reizgröße (hier die Zunahme der zu beurteilenden Dauer) sollte auch zu einer schlechteren Beurteilung der Reizgröße führen.

Wie konzeptioniert die *scalar timing theory* die Abbildung physikalischer Zeit auf die psychologische Ebene bzw. Verhaltensebene? Wie schon bei Creelman (1962) und bei Kristofferson (1967) wird ein verhaltensregulierender Mechanismus angenommen, der den Lauf der Zeit als Summe von ausgesendeten Impulsen repräsentiert. Der Zeitabbildungsmechanismus enthält mehrere, miteinander verzahnte Komponenten: eine innere Uhr (*internal clock*), ein Zeitgedächtnis und einen Entscheidungsprozeß. Die innere Uhr besteht wiederum aus einzelnen Elementen. Angenommen wird ein Schrittmacher (*pacemaker*), der mit bestimmter Wahrscheinlichkeit Impulse produziert und damit einen internen Rhythmus

generiert. Die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit wird als poissonverteilt angenommen. Um die Ausdehnung eines Zeitintervalls beurteilen zu können, müssen die Impulse akkumuliert werden. Das Gibbonsche Modell geht davon aus, daß die ausgesendeten Impulse in einem sog. Akkumulator (*accumulator*) addiert und gespeichert werden. Das Aussenden von Impulsen und deren Akkumulation enden mit Beendigung des Signals, dessen Dauer beurteilt werden soll. Der durchschnittliche Wert der im Akkumulator aufgezeichneten Impulse ist das Produkt aus der Frequenz des Schrittmachers und der Dauer des Akkumulationsprozesses. Insofern wird eine gewichtete lineare Beziehung zwischen objektiver und psychologischer Zeit angenommen, deren Steigung die Frequenz des Schrittmachers reflektiert (s. Abbildung 6). Die potentielle Anzahl der akkumulierten Impulse ist theoretisch unbegrenzt.

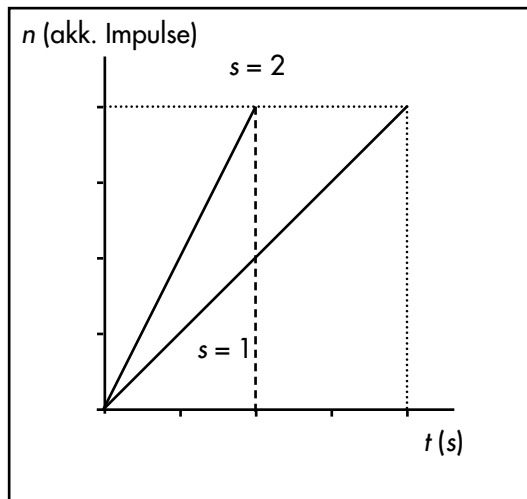


Abbildung 6. Illustration des gewichteten linearen Zusammenhangs zwischen objektiver und psychologischer Zeit. Objektive Zeit ist repräsentiert durch das Sekundenmaß (Abszisse), psychologische Zeit ist repräsentiert durch die Anzahl (n) akkumulierter Impulse (Ordinate). Bei einer Steigung der Geraden von $s = 1$ entspricht eine physikalische Sekunde einem bestimmten Quantum akkumulierter Impulse. Bei einer Steigung der Geraden von $s = 2$ verdoppelt sich das Quantum akkumulierter Impulse je verstrichener Sekunde.

Zwischen Schrittmacher und Akkumulator wird ein Schalter (*switch*) angenommen, der die Aufnahme von Impulsen in den Akkumulator reguliert. Ist der Schalter geöffnet, gelangen – analog einem Stromkreis – keine Impulse in den Akkumulator, ist er hingegen geschlossen, werden Impulse akkumuliert. Der Schalter schließt und öffnet mit gewisser Verzögerung, so daß die effektive subjektive Dauer eines Stimulus durch dasjenige Zeitintervall definiert ist, das zwischen Schließung und Öffnung des Schalters besteht.

Impulsgenerierung und Akkumulationsprozeß sind nicht nur Voraussetzung für die subjektive Quantifizierung von Zeit, sondern können darüber hinaus auch der Bestimmung beliebiger anderer Quantitäten dienen. Meck und Church (Meck, 1997; Meck & Church,

1983; Meck, Church & Gibbon, 1985) haben als Ergänzung zur *scalar timing theory* in ihrem *mode-control model of temporal integration for the discrimination of duration and number* die Arbeitsweise des Schrittmacher-Akkumulator-Systems konkretisiert und erweitert. Dem Modell zufolge existiert für die Quantifizierung von Zeitintervallen und Anzahlen ein gemeinsamer Mechanismus. Wie in der *scalar timing theory* wird ein Schalter angenommen, der durch Schließung oder Öffnung den Transfer der Impulse vom Schrittmacher zum Akkumulator reguliert. Zusätzlich wird angenommen, daß die Übertragung der Impulse in den Akkumulator in drei unterschiedlichen Modi erfolgen kann (vgl. Abbildung 7): Im *run*-Modus startet der Akkumulationsprozeß mit Beginn des ersten Stimulus einer relevanten Serie von Stimuli und endet mit Beendigung des letzten Stimulus. Im *stop*-Modus werden Impulse immer dann akkumuliert, wenn ein konkreter Stimulus erscheint; sobald dieser endet, wird auch die Akkumulation unterbrochen. Schließlich produziert im *event*-Modus jeder Beginn eines Stimulus eine feste Anzahl von Impulsen, unabhängig von der tatsächlichen Dauer des Stimulus. Über den *run*- und den *stop*-Modus können Dauern geschätzt werden. Der *event*-Modus erlaubt die Schätzung von Anzahlen, indem die Anzahl der akkumulierten Impulse nicht die Dauer des Ereignisses repräsentiert, sondern die Anzahl der Segmente innerhalb eines Ereignisses.

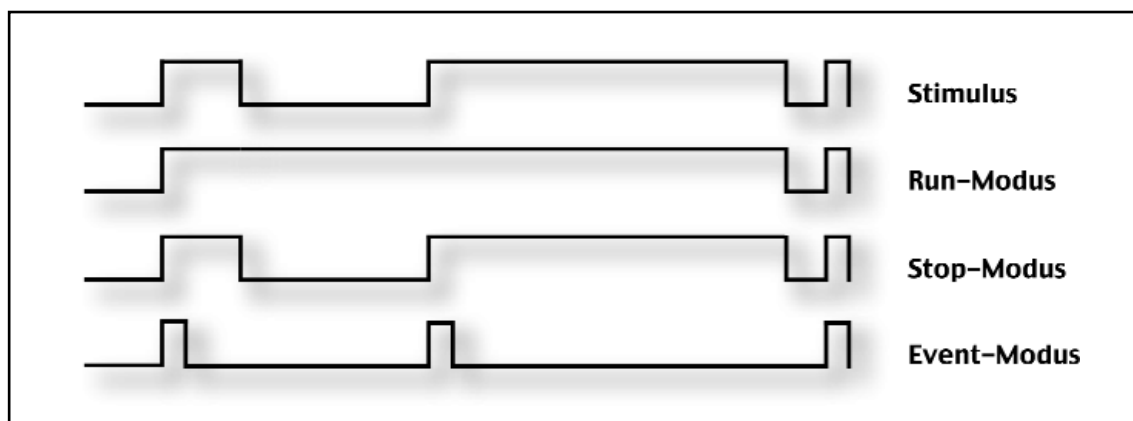


Abbildung 7. Drei Modi der Akkumulation von Schrittmacherimpulsen.

Die behavioral theory of timing

Ein Schrittmacher-Akkumulator-Modell, das sich von der *scalar timing theory* abgrenzt, ist die von Killeen und Fettermann entwickelte *behavioral timing theory* (Fettermann & Killeen, 1990; Killeen & Fettermann, 1988). Die Autoren gehen davon aus, daß zeitliche Urteile auf einzelne Handlungen gegründet werden, die mit Verstärkung verbunden sind.

Jedes Verhalten korrespondiert mit einem bestimmten internen Zustand (*state*). Diese Zustände sind von veränderbarer Dauer, und ein einzelnes Verhalten kann entweder mit einem einzigen oder auch mit mehreren Zuständen assoziiert sein. Übergänge zwischen den Zuständen und damit verbundene Verhaltensänderungen werden durch Impulse einer inneren Uhr verursacht. Der Schrittmacher dieser inneren Uhr wird als Poisson-Prozeß aufgefaßt. Nicht die Impulse selbst werden zur Beurteilung eines Zeitintervalls herangezogen, sondern die mit diesen verbundenen Zustände resp. Reaktionen dienen als diskriminative Reize für nachfolgende Reaktionen.

In timing experiments, if an animal is interrupted while in some state and asked to respond short or long, it will make whichever response has been most often associated with reinforcement in the context of the behaviors associated with that state. (Killeen & Fettermann, 1988, p. 274)

Killeen und Fettermann nehmen an, daß die Frequenz des Schrittmachers proportional zur Häufigkeit der Verstärkungen pro Zeiteinheit ist (Killeen & Fettermann, 1988; McEwan & Killeen, 1991). Eine der Besonderheiten der *behavioral theory of timing* gegenüber anderen psychologischen Zeit-Theorien (wie z. B. der *scalar timing theory*) liegt in ihrer relativen Einfachheit. Weder werden bestimmte Abbildungsrelationen zwischen objektiver und subjektiver Zeit angenommen, noch werden Gedächtnisrepräsentationen von Zeit und komplizierte Entscheidungsprozesse zugrundegelegt.

We do not talk about the perception of time of subjective scales of it, or of ratio comparisons of one memorial representation with another, but rather of simple conditional discriminations. (Killeen & Fettermann, 1988, p. 275)

Gerade deshalb kann diese Theorie wenig zur Analyse von Gedächtnisprozessen beisteuern, die für zeitbezogenes Verhalten vermutet und als Teil allgemeiner, übergeordneter Gedächtnisfunktionen angesehen werden können.

Das Gedächtnis für Zeitintervalle

Viele Methoden zur Erfassung subjektiver Zeit sprechen neben sensorischen und quasi-sensorischen Funktionen auch Memorierungsfunktionen an. Beispielsweise müssen bei der Produktion von Zeitintervallen, bei der Versuchspersonen per Knopfdruck ein bestimmtes Zeitintervall eingrenzen sollen, das zu produzierende Intervall mit einem Referenzwert in Beziehung setzen. Da das Modell der inneren Uhr bislang nur die Produktion eines internen Rhythmus und damit – über die Akkumulation von Impulsen – die Zuordnung eines Wertes zu einer bestimmten Anzahl von Impulsen erlaubt, muß zusätzlich für ein Zeitbeurteilungssystem eine Gedächtniskomponente angenommen werden, die für die längerfristige Speicherung von Zeitintervallen verantwortlich zeichnet.

Das Kurzzeitgedächtnis für Zeitintervalle

Der „choose short effect“

In Studien von Spetch und Mitarbeitern wurde über die Anwendung der *delayed matching-to-sample-Methode* (vgl. Appendix 1) das Vergessen kurzzeitig behaltener Zeitintervalle untersucht (z. B. Grant & Kelly, 1996; Grant & Robinson, 1993; Grant & Spetch, 1991; Grant, Spetch & Kelly, 1997; Spetch & Wilkie, 1982, 1983). Ein typisches Experiment beginnt mit der Darbietung eines Lichtsignals, das entweder kurz (z. B. zwei Sekunden) oder lang (z. B. zehn Sekunden) dauert. Unmittelbar im Anschluß an die Darbietung wird einer von zwei Stimuli (z. B. Farben, geometrische Formen, Linien in unterschiedlicher Orientierung) präsentiert. Eine Reaktion auf einen dieser Stimuli (z. B. bei Tauben das Picken auf einen rot beleuchteten Knopf) wird dann verstärkt, wenn das Lichtsignal für die kurze Dauer darge-

boten wurde, eine Reaktion auf den anderen Stimulus, wenn das Lichtsignal für die lange Dauer dargeboten wurde. Das Versuchssubjekt lernt folglich zwei Zeitintervalle und die jeweils mit diesen assoziierten Reaktionen zu diskriminieren. Nach einer intensiven Trainingsphase wird das Gedächtnis für die beiden Zeitintervalle getestet, indem ein variables Verzögerungsintervall (*delay*) zwischen Beendigung des Lichtsignals und Präsentation der Reaktionsstimuli eingeschoben wird. Üblicherweise sinkt die Anzahl korrekter Entscheidungen mit zunehmendem Verzögerungsintervall (z. B. Fetterman, 1995; Grant & Spetch, 1991; Spetch & Grant, 1993; Spetch & Wilkie, 1982). Abbildung 8 illustriert diesen Zusammenhang.

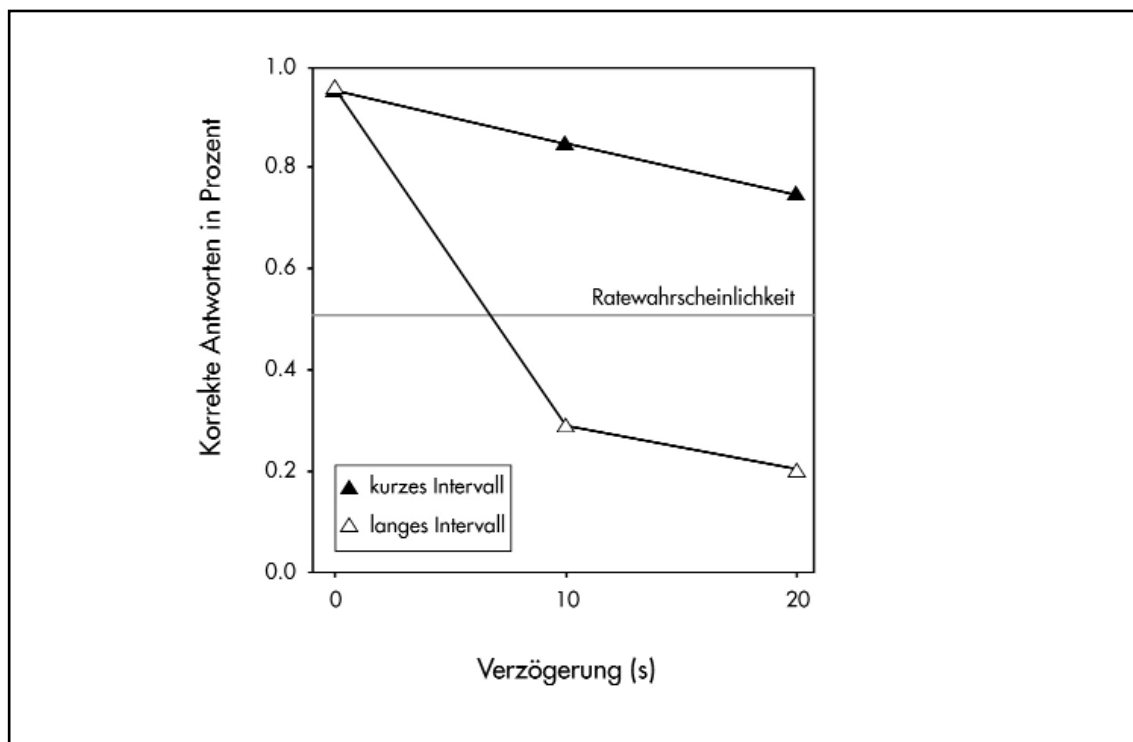


Abbildung 8. Mittlere Häufigkeit korrekter Entscheidungen als Funktion der Verzögerung bis zum Abruf in Versuchsdurchgängen mit kurzen (2 s) und langen (10 s) Stimuli (nach Spetch & Grant, 1993, Experiment 1)

Bei Versuchsdurchgängen mit kurz andauerndem Lichtsignal sinkt die Häufigkeit korrekter Entscheidungen mit anwachsendem Behaltensintervall nur gering, während bei Versuchsdurchgängen mit lang andauerndem Lichtsignal die Häufigkeit korrekter Entscheidungen rapide abnimmt, je länger das Behaltensintervall ist, und mit zunehmendem

Behaltensintervall sogar unter die Zufallsgrenze sinkt. Das bedeutet, daß die Versuchssubjekte in der Regel dazu neigen, bei langen Behaltensintervallen sich für denjenigen Stimulus zu entscheiden, der mit der kurzen Dauer assoziiert ist. Dieses Phänomen haben Spetch und Wilkie (1982) als *choose-short effect* bezeichnet. Sie interpretierten diesen Effekt als das Ergebnis einer „Verkürzung“ der mental repräsentierten Dauer (*subjective shortening*). Dieser Interpretation zufolge führt das Testen eines Versuchssubjekts unmittelbar nach Beendigung des langen Lichtsignals (also ohne interpoliertes Behaltensintervall) zu einer hohen Wahrscheinlichkeit richtiger Antworten, weil die Repräsentation der Dauer im Arbeitsgedächtnis stark mit der Repräsentation der langen Dauer im Langzeit- bzw. Referenzgedächtnis korrespondiert. Mit zunehmendem Behaltensintervall jedoch verringert sich das Ausmaß der subjektiven Dauer im Arbeitsgedächtnis und korrespondiert damit immer weniger mit der langen Dauer des Langzeitgedächtnisses, sondern stattdessen immer mehr mit der im Langzeitgedächtnis repräsentierten kurzen Dauer. Folglich entsteht eine zunehmende Tendenz des Versuchssubjekts, denjenigen Stimulus zu wählen, der mit der kurzen Dauer assoziiert ist.

Ein weiterer Hinweis auf das *subjective shortening* stammt aus Untersuchungen, in denen bereits in der Trainingsphase ein Verzögerungsintervall zwischen der zu lernenden Stimulusdauer und dem zugehörigen Reaktionsreiz implementiert wurde (z. B. Spetch, 1987; Spetch & Rusak, 1989). Wurde anschließend mit kürzeren Verzögerungsintervallen getestet, resultierte ein sog. *choose-long effect*, d. h. eine Tendenz zur häufigeren Reaktion auf Stimuli, die mit dem längeren Intervall assoziiert sind. Begründet wurde dieser Effekt dadurch, daß das Gedächtnis für die kurze Dauer dem Gedächtnis für die lange Dauer zunehmend ähnlicher wird, je kürzer das Verzögerungsintervall wird.

Untersuchungen zum *choose-short effect* wurden nicht nur mit Tauben, sondern auch mit Ratten (z. B. Cabeza de Vaca, Brown & Hemmes, 1994) und Menschen (z. B. Wearden & Ferrara, 1993) durchgeführt. Wearden und Ferrara (1993) untersuchten das menschliche Kurzzeitgedächtnis für Zeitintervalle, indem sie die Methode von Spetch und Wilkie (1982) mit einigen Änderungen übernahmen. Sie ließen Versuchspersonen die Dauer (Standard-

dauer; 400 ms) eines 500 Hertz Tones mit nachfolgenden Dauern vergleichen, die entweder gleich der Standarddauer oder kürzer bzw. länger waren. Das Behaltensintervall wurde zwischen einer und 16 Sekunden variiert. Insgesamt veränderte sich die mittlere Anzahl korrekter Entscheidungen („gleich“ versus „ungleich“ bzw. „gleich“ versus „kürzer“ oder „länger“) nicht mit anwachsendem Behaltensintervall. Jedoch zeigte sich ein Interaktionseffekt: die Leistung der Versuchspersonen verschlechterte sich, wenn die Standarddauer und das Vergleichsintervall gleich waren; sie blieb unverändert, wenn das Vergleichsintervall kürzer als die Standarddauer war; und sie stieg, wenn das Vergleichsintervall länger als die Standarddauer war. Wearden und Ferrara interpretierten ihre Ergebnisse als das Resultat zweier paralleler Prozesse: einerseits ein *subjective shortening effect* mit zunehmendem Verzögerungsintervall, andererseits ein sog. Zeitreihenfolgefehler (*time order error*), der in der Neigung der Versuchspersonen bestand, das (zuerst dargebotene) Standardintervall tendenziell als länger als die Vergleichsintervalle zu beurteilen.

Die Interpretation des *choose-short effect* als Ergebnis einer verkürzten subjektiven Dauer im Arbeitsgedächtnis blieb indes nicht unwidersprochen. Kraemer, Mazmanian und Roberts (1985) schlagen statt einer analogen Repräsentation von Zeitintervallen alternativ eine kategoriale Repräsentation vor (z. B. „kurz“ und „lang“). Sie erklären den *choose-short effect* dadurch, daß die Tendenz, fälschlicherweise mit „kurz“ zu antworten (bzw. auf den mit der kurzen Dauer assoziierten Stimulus zu reagieren), daraus resultiert, daß die Repräsentation der langen Dauer mit zunehmendem Behaltensintervall „verschwindet“. Folglich schätzt das Versuchssubjekt den Inhalt des Arbeitsgedächtnisses der kurzen Dauer näherstehend oder ähnlicher als der langen Dauer.

Kapazitätsbeschränkungen und funktionale Komponenten des Kurzzeitgedächtnisses für Zeitintervalle

Nur wenige Untersuchungen haben sich explizit der Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses für Zeitintervalle gewidmet. McGavren (1965) variierte in einer auditiven Paarvergleichsaufgabe (vgl. Appendix 1) das Intervall zwischen der Darbietung einer Standarddauer

er (700 ms) und der Darbietung einer Vergleichsdauer (400, 500, 600, 800, 900 oder 1000 ms) von 375 ms bis 12 s. Folgte innerhalb eines Reizpaares die Vergleichsdauer der Standarddauer, war die Häufigkeit der Fehler relativ niedrig und unabhängig von der Länge des Inter-Stimulus-Intervalls (ISI). Ging jedoch die Vergleichsdauer der Standarddauer voraus, stieg die Häufigkeit der Fehler jenseits eines ISI von 1500 ms deutlich an. Da die Standarddauer in jedem von insgesamt 216 Versuchsdurchgängen dargeboten wurde, während jede der Vergleichsdauern durchschnittlich nur in jedem sechsten Versuchsdurchgang präsentiert wurde, scheint es naheliegend, daß die Standarddauer im Langzeitgedächtnis gespeichert war, wohingegen die Vergleichsdauern nur kurzfristig für die Dauer eines Durchgangs behalten wurden. Trifft diese Interpretation zu, könnte das deutliche Anwachsen von Fehlurteilen nach 1500 ms auf ein Nachlassen der Behaltensleistung des Kurzzeitgedächtnisses zurückgeführt werden. Demnach lieferte die Untersuchung von McGavren eine erste Schätzung für die zeitliche Kapazität des temporalen Kurzzeitgedächtnisses.

Guay und Wilberg (1983) untersuchten die Behaltenskapazität des Kurzzeitgedächtnisses mit längeren Zeitintervallen (eine Sekunde und vier Sekunden) mit Hilfe der Reproduktionsmethode. Abhängige Variable war die Reproduktionsleistung. Die Reproduktion der Intervalle verschlechterte sich, wenn sie nicht unmittelbar oder nach selbstinitiiertem Beginn der Reproduktion, sondern erst mit deutlicher Verzögerung (nach 15 bzw. 30 Sekunden) erfolgte. Auch hier zeigte sich eine Verschlechterung der Behaltensleistung, die auf Beschränkungen des Kurzzeitgedächtnisses zurückgeführt werden können.

Grube (1998) prüfte die Hypothese, daß am kurzfristigen Behalten von akustischen Rhythmen sowohl die phonologische Schleife als auch der phonetische Speicher des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Baddeley, 1986; 1990) beteiligt sind. Die Hypothesen konnten bestätigt werden. Rhythmen lassen sich besser reproduzieren, je schneller sie durch Rehearsalprozesse innerlich wiederholt werden können. Ferner konnten zeitlich komprimierte (i. e. kürzere) Rhythmen besser reproduziert werden als zeitlich gedehnte (i. e. längere) Rhythmen, was Grube auf eine Beteiligung des phonetischen Speichers beim Behalten von Zeitmustern zurückführte, da dieser – analog zum Effekt der Wortlänge bei verbalem Material – Information nur für kurze Dauer aufbewahren kann.

Das Langzeitgedächtnis für Zeitintervalle

Das in der *scalar timing theory* (Gibbon, 1991; Gibbon & Church, 1984) postulierte Gedächtnissystem beinhaltet sowohl ein Arbeitsgedächtnis (*working memory*) als auch ein Langzeitgedächtnis (*reference memory*), das eine längerfristige Speicherung erlaubt. Während das Kurzzeit- oder Arbeitsgedächtnis wenig Beachtung findet und lediglich als Ort aufgefaßt wird, in dem der Wert der akkumulierten Impulse kurzfristig bei Abwesenheit des Signals zwischengespeichert wird, ist das Langzeitgedächtnis differenzierter konzipiert. Zeitintervalle werden dann im Langzeitgedächtnis gespeichert, wenn sie für das Subjekt Bedeutung besitzen, d. h. zum Beispiel im Tierversuch nach Darbietung eines Verstärkungsreizes. In einem einzelnen Versuchsdurchgang kann ein bestimmtes Zeitintervall (repräsentiert als Wert aufsummierter Impulse) in das Langzeitgedächtnis überführt werden, wobei der Wert der akkumulierten Impulse mit einer Konstanten (*proportionality constant* k^*) gewichtet wird. Nach einer Serie von Versuchsdurchgängen entsteht aufgrund einer angenommenen Variabilität einzelner Parameter zwischen den Durchgängen eine Verteilung von Werten im Langzeitgedächtnis.

When, on a given trial, reinforcement is obtained at a time, T^ , the value for accumulated pulses stored in working memory on that trial is translated to reference memory via the proportionality constant, k^* . Reference memory then comes to contain a distribution of remembered values over successive trials, resulting from the linear accumulation and storage mechanisms.* (Gibbon, 1991, p. 23)

Welcher Art diese Verteilung ist, wird im Rahmen der Theorie nicht spezifiziert. Auch über die Art des Lernprozesses besteht noch Klärungsbedarf. So ist z. B. unklar, wieviele Werte im Langzeitgedächtnis gespeichert werden und wie diese für den späteren Vergleich ausgewählt werden (vgl. Brunner, Fairhurst, Stolovitsky & Gibbon, 1997).

Wearden, Pilkington und Carter (1999) untersuchten mit einer *temporal generalization*-Aufgabe die Hypothese, daß die Interpretation des *subjective shortening* (s. o.) als Form des Vergessens temporaler Information des Kurzzeitgedächtnisses auch auf das Vergessen

bzgl. des Langzeitgedächtnisses angewendet werden kann. Nach einer fünfmaligen Präsentation eines akustischen oder optischen Standardreizes, dessen Dauer (400 ms) behalten werden sollte, wurden den Versuchspersonen in der anschließenden Testphase Vergleichsreize (zwischen 100 ms und 700 ms) dargeboten. Aufgabe der Versuchspersonen war es zu entscheiden, ob die Dauer der dargebotenen Stimuli der Standarddauer entsprach oder nicht. Die Versuchspersonen konnten also entweder mit „Ja“ oder mit „Nein“ antworten. Eine Rückmeldung darüber, ob die Versuchspersonen korrekt entschieden hatten, erfolgte nicht. Im Unterschied zu Untersuchungen zum *subjective shortening* wurde den Versuchspersonen der Standardreiz nicht zu Beginn eines jeden Versuchsdurchgangs präsentiert, sondern sie mußten mit der anfänglichen fünfmaligen Darbietung auskommen, um ein späteres Urteil über die Dauer der Vergleichsreize zu treffen. Es zeigte sich, daß die Versuchspersonen die Dauer vor allem der optischen Stimuli mit Fortschreiten der Testphase zunehmend stärker unterschätzten. Die Häufigkeit, mit der ein Vergleichsreiz mit einer Dauer größer als 400 ms als Standardreiz identifiziert wurde, nahm im Verlauf der Zeit zu, so daß es den Anschein hatte, daß sich die gespeicherte Dauer des Standardreizes systematisch „verlängerte“. Wearden et al. (1999) interpretierten dieses „*subjective lengthening*“ allerdings nicht als einen Gedächtniseffekt, sondern als das Ergebnis eines „arousal-related change in timing processes“ (p. 37), der zu einer zunehmenden Verlangsamung der inneren Uhr geführt haben sollte.

Guay (1982) ließ Versuchspersonen Intervalle von einer, vier und acht Sekunden sofort nach Beendigung der Lernphase, nach zwei Tagen, nach 14 Tagen und nach 28 Tagen reproduzieren. Unabhängig von der Länge der gelernten Intervalle verschlechterte sich die Reproduktionsleistung bei zunehmendem Behaltensintervall, was auf einen anwachsenden Rückgang der Erinnerungsleistung schließen läßt.

Theorien über das Gedächtnis für zeitliche Informationen sind auch von Autoren entwickelt worden, die die Annahme der Existenz einer inneren Uhr für die Modellierung von Gedächtnisprozessen als nicht entscheidend betrachten. Estes z. B. (Estes, 1980, 1985) interpretiert das temporale Gedächtnis als Enkodierung (*encoding*) und Speicherung (*retention*)

von Informationen über die zeitlichen Eigenschaften von Ereignissen oder Sequenzen von Ereignissen (Estes, 1985, p. 151). Er unterscheidet im wesentlichen sog. Enkodiermodelle (*encoding models*) und Gedächtnisspurmodelle (*trace strength models*). Beide Modelle beinhalten – im Gegensatz zu den quantitativen, aus der Tradition der Psychophysik stammenden Modellen – die Annahme, daß die zeitlichen Eigenschaften von Ereignissen (wie deren Dauer und zeitliche Abfolge) in der gleichen Weise verarbeitet werden wie andere, nicht-zeitliche Ereigniseigenschaften. Zeitliche Information ist in die Repräsentation des Ereignisses integriert (Estes, 1982).

Die Basisannahme des von Estes (1972) entwickelten und von Lee und Estes (1981) ausgeweiteten sog. Enkodier-/Störungs-Modells (*encoding/perturbation model*) beinhaltet, daß bei Wahrnehmung eines Ereignisses – automatisch oder bewußt – Informationen bezüglich des Intervalls zwischen diesem und anderen Ereignissen, die mit ihm in Beziehung stehen, enkodiert werden. Fehler in der Beurteilung eines Zeitintervalls lassen sich nach diesem Modell darauf zurückführen, daß die Enkodierung der Intervalle mit einem normalverteilten Fehler behaftet ist, der zu einer – ebenfalls normalen – Verteilung von internen, das Intervall repräsentierenden Werten führt.

Gedächtnisspurmodelle (vgl. Schmidt, 1996) nehmen an, daß das Urteil einer Person über die relative Neuheit eines Ereignisses sich auf die Stärke der Gedächtnisspur gründet, die mit Wahrnehmung des Ereignisses gebildet wurde. Die Stärke der Gedächtnisspur bzw. deren Verfügbarkeit verringert sich im Laufe der Zeit. Das Modell läßt sich damit auf die Dauerschätzung anwenden. Die Dauer eines Ereignisses ist immer die Dauer zwischen dem Beginn und der Beendigung des Ereignisses. Beginn und Ende sind selbst wiederum Ereignisse, deren Wahrnehmung jeweils eine Gedächtnisspur ausbildet. Da die Gedächtnisspuren mit der Zeit verblassen, läßt sich die Dauer eines Ereignisses AB mit den beiden Begrenzungspunkten A und B als *Differenz* der Stärke der beiden Gedächtnisspuren für A und B bestimmen. Je größer der Unterschied zwischen Gedächtnisspur A und Gedächtnisspur B, desto größer die Dauer zwischen beiden Ereignissen.

Entscheidungskriterien

Es gehört zu den wesentlichen Vorzügen der *scalar timing theory* gegenüber anderen psychophysischen Zeitdiskriminationstheorien, daß in ihr ein Entscheidungsprozeß spezifiziert wird, innerhalb dessen ein bestimmtes Zeitintervall beurteilt werden kann. Denn will ein Subjekt entscheiden, ob ein aktuelles Zeitintervall einem gespeicherten entspricht, muß es beide miteinander vergleichen. Es vergleicht also die Anzahl akkumulierter Impulse, die das aktuelle Zeitintervall repräsentieren, mit dem Wert eines Intervalls, das im Langzeitgedächtnis gespeichert ist.

Church und Gibbon (1982) postulieren, daß das Verhalten von Ratten in einem ihrer *temporal generalization*-Experimente (s. Kapitel „Verwendete Methode und ihre Begründung“) das Resultat eines subjektiven Vergleichsprozesses ist, in welchem die Versuchstiere in jedem Durchgang die absolute Differenz zwischen einem aktuell wahrgenommenen Zeitintervall, t (d. i. die Anzahl akkumulierter Impulse), und einer Stichprobe (*sample*) s^* aus der Verteilung der im Gedächtnis abgelegten Werte für das Standardintervall, s , berechnen. Dieser Betrag wird an dem Wert der Gedächtnisstichprobe relativiert und anschließend in Beziehung gesetzt zu einem Entscheidungskriterium (*threshold level*), b^* . Auch das für den Vergleich herangezogene Entscheidungskriterium wird als Stichprobe aus einer Verteilung von Kriteriumswerten (mit einem mittleren Wert b) gezogen. Diese Beziehung kann in einer einfachen Formel ausgedrückt werden:

$$|(s^* - t)|/s < b^*.$$

Übersteigt das Vergleichsmaß das Kriterium, werden zwei zu vergleichende Zeitintervalle als unterschiedlich bewertet. Zeitbeurteilungsvariabilität zwischen Versuchsdurchgängen ist nach der *scalar timing theory* zurückzuführen auf unterschiedliche Ausprägungen von s^* und b^* . Das Kriterium kann ferner durch unterschiedliche Faktoren wie z. B. Aufgabenschwierigkeit und Verstärkungswahrscheinlichkeit beeinflusst werden (Church, Meck & Gibbon, 1994). Wearden (1992) schlägt zur Erklärung seiner Daten aus *temporal generalization*-Experimenten eine modifizierte Entscheidungsregel vor. Versuchspersonen

zeigten im Gegensatz zu Versuchstieren eine deutliche Asymmetrie in ihrem Antwortverhalten: Zeitintervalle, die größer als das Standardintervall waren, wurden häufiger mit diesem identifiziert als Zeitintervalle, die kleiner als das Standardintervall waren. Der Generalisationsgradient, d. i. die grafische Veranschaulichung der mittleren prozentualen Häufigkeiten von Identifikationen je dargebotenem Zeitintervall, verlief linkssteil und rechts relativ abgeflacht. Wearden ersetzte in der Entscheidungsregel von Church und Gibbon (1982) den mittleren Wert der im Gedächtnis repräsentierten Standarddauer, s , im Nenner durch den Wert der wahrgenommenen Dauer des dargebotenen Stimulus, t :

$$|(s^* - t)|/t < b^*.$$

Abbildung 9 zeigt zusammenfassend ein Modell der Verarbeitung von Zeitintervallen nach der *scalar timing theory*.

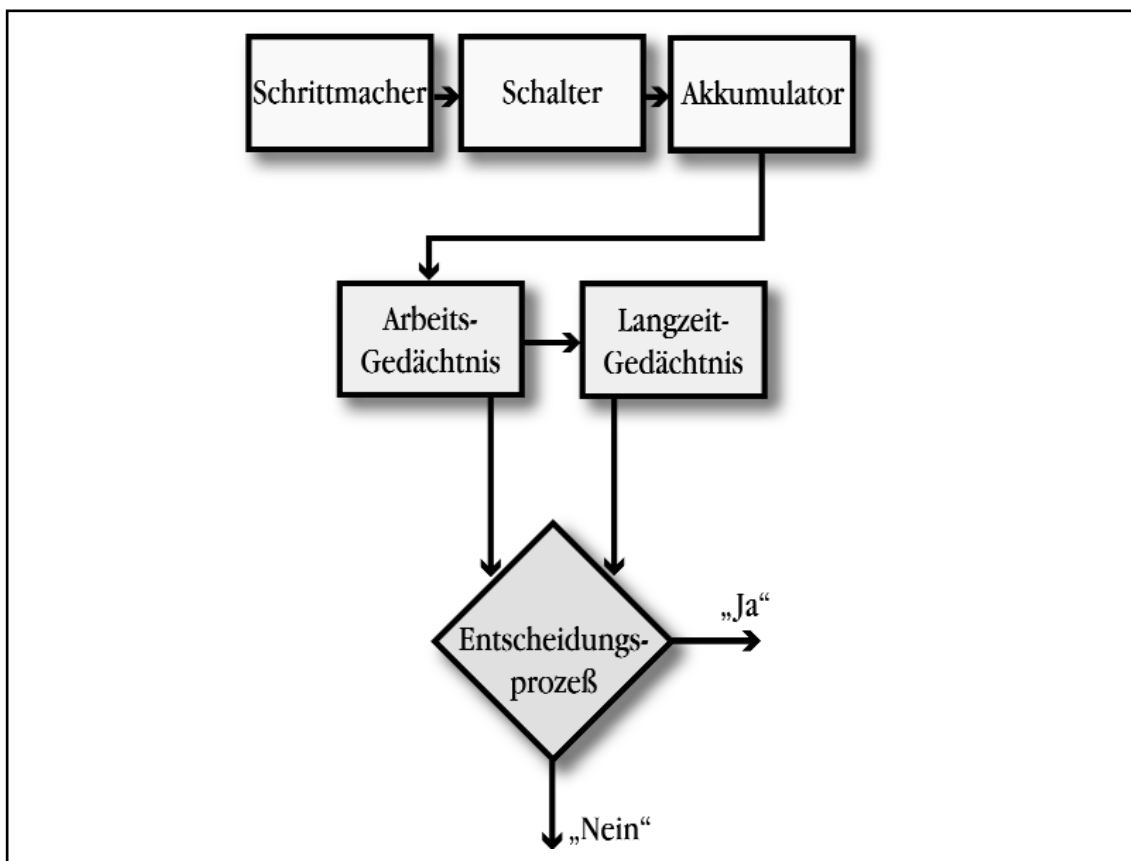


Abbildung 9. Schematische Darstellung des Informationsverarbeitungsmodells nach der *scalar timing theory* (Gibbon, Church & Meck, 1984). Schrittmacher, Schalter und Akkumulator bilden die „innere Uhr“, deren „Output“, ein Summenwert akkumulierter Impulse, im Arbeitsgedächtnis zwischen- und im Langzeitgedächtnis längerfristig gespeichert wird. Zur Beurteilung eines aktuellen Zeitintervalls werden sowohl der gespeicherte Zeitwert als auch der akkumulierte Wert des aktuellen Intervalls miteinander verglichen und eine Entscheidung über Gleich- bzw. Verschiedenheit beider Intervalle getroffen.

Variabilität von Zeitschätzungen

Daten sowohl aus tierpsychologischen Konditionierungsstudien als auch aus Zeitschätzungsexperimenten mit Versuchspersonen zeigen zwei Eigentümlichkeiten der subjektiven Zeiterfassung: (1) Obwohl die Beurteilung eines Zeitintervalls im Mittel mit seiner tatsächlichen Ausdehnung übereinstimmt, läßt die Genauigkeit der Beurteilung hingegen mit zunehmendem Zeitintervall nach. (2) Zeitschätzungen sind praktisch niemals „punktgenau“, sondern streuen von Versuchsdurchgang zu Versuchsdurchgang mehr oder weniger um den Betrag des zu beurteilenden Intervalls.

Im Rahmen psychophysischer Modelle subjektiver Zeit wurden daher Ideen entwickelt, wie diese Variabilität zu quantifizieren sei und welche Gesetzmäßigkeit sich darin widerspiegele. Je nach zugrundegelegter Theorie werden in der Literatur *eine* (Kristofferson, 1977, 1984; Treisman, 1963; Treisman & Brogan, 1992; Treisman, Faulkner, Naish & Brogan, 1990), *drei* (Creelman, 1962; Gibbon & Church, 1990) oder *vier* (Church, Meck & Gibbon, 1994; Gibbon, 1991) voneinander unabhängige Varianzquellen innerhalb des Zeitverarbeitungsprozesses ausgemacht.

Eine detaillierte Auseinandersetzung mit potentiellen Quellen der Variabilität findet sich in der *scalar timing theory*. In ihr werden drei unterschiedliche Modi intraindividuellere Zeitbeurteilungsvariabilität, aus denen sich die Gesamtvarianz zusammensetzt, beschrieben (Gibbon, 1991, pp. 27-29): (1) *konstante* Varianz (Schalter), (2) *skalare* bzw. *proportionale* Varianz (Entscheidungskriterium und Memorierungsgeschwindigkeit) sowie (3) *Poisson*-Varianz (Schrittmacher).

Eine grundsätzliche Schwierigkeit im Rahmen aller Uhrmodelle besteht darin, empirisch erfaßte Variabilität einzelnen Subsystemen des Zeitverarbeitungsprozesses (Schrittmacher-Akkumulator-System, Gedächtnis, Vergleichsprozeß) eindeutig zuzuordnen, da während der Beurteilung eines Zeitintervalls in der Regel alle Subsysteme beteiligt sind und miteinander interagieren. Unter Berücksichtigung aller wesentlichen quantitativen Modelle lassen sich *insgesamt* im Hinblick auf die potentielle Zuschreibbarkeit der Variabilität von

Zeitbeurteilungen zu Komponenten der Zeitverarbeitung *fünf* Varianzquellen unterscheiden, die im folgenden dargestellt werden.

Variabilität des Schrittmachers

Eine naheliegende Quelle von Variabilität scheint in dem Schrittmacher selbst zu liegen. Creelman (1962) war der Ansicht, daß die Produktion von Impulsen wegen der Annahme einer stochastischen Produktionsquelle Zufallsschwankungen unterliege und damit die innere Uhr selbst generell unreliabel sei. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Anzahl an Impulsen innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls produziert würde, ließe sich durch eine Poissonverteilung beschreiben. Eine weitere Variabilitätsquelle sah Creelman in der Latenz der Impulsproduktion bei Darbietung eines relevanten Signals.

Hingegen sieht das von Treisman (1963) entwickelte Modell eine fehlerfreie Impulsakkumulation vor. "There is an internal source of temporal information or pacemaker that produces a regular series of pulses. These are emitted at an approximateley constant inter-pulse interval (...)" (Treisman & Brogan, 1992, p. 43). Variationen in Zeitschätzungen sind diesem Modell zufolge zurückzuführen auf Variationen im Aktivationsniveau (*arousal*) des Individuums, welche durch externe Einflüsse bedingt sein können. Bei anwachsendem Aktivationsniveau steigt auch die Frequenz des Schrittmachers.

Kristofferson (1977, 1984) betrachtet in seiner *real-time criterion theory of timing* das Zeitschätzungssystem im großen und ganzen als reliabel und damit fehlerfrei. Varianz ist in seinem Modell lediglich dadurch bedingt, daß die Länge eines intern abgebildeten Zeitintervalls variieren kann.

Die *scalar timing theory* setzt sich explizit das Ziel, Variabilität von zeitlich kontrolliertem Verhalten umfassend zu erklären (Gibbon, 1977, p. 281). Der Schrittmacher ist als Zufallsgenerator konzipiert, der Impulse emittiert, deren Abstände poissonverteilt sind. Unter der Annahme einer perfekten Reliabilität aller anderen beteiligten Komponenten des Zeitverarbeitungsprozesses würde eine Verdopplung des zu beurteilenden Zeitintervalls

auch zu einer Verdopplung der Anzahl der Impulse führen. Der Poissonprozeß generiert dadurch mittlere Schätzungen, die proportional zum betreffenden Zeitintervall sind. Die Streuung der Zeitschätzung hingegen wächst unter Zugrundelegung eines Poisson-Impulsgebers mit der Quadratwurzel des zu beurteilenden Intervalls ($\sigma = \sqrt{\mu}$). Daraus folgt, daß Zeitschätzungen unter Annahme der Poissonverteilung zu einer relativ höheren Genauigkeit führen, je länger das zu schätzende Intervall ist. Wird die Streuung an der mittleren Schätzung relativiert ($\sigma(T)/\mu(T)$), zeigt sich eine Abnahme der relativierten Streuung mit zunehmendem Zeitintervall (siehe Abbildung 10).

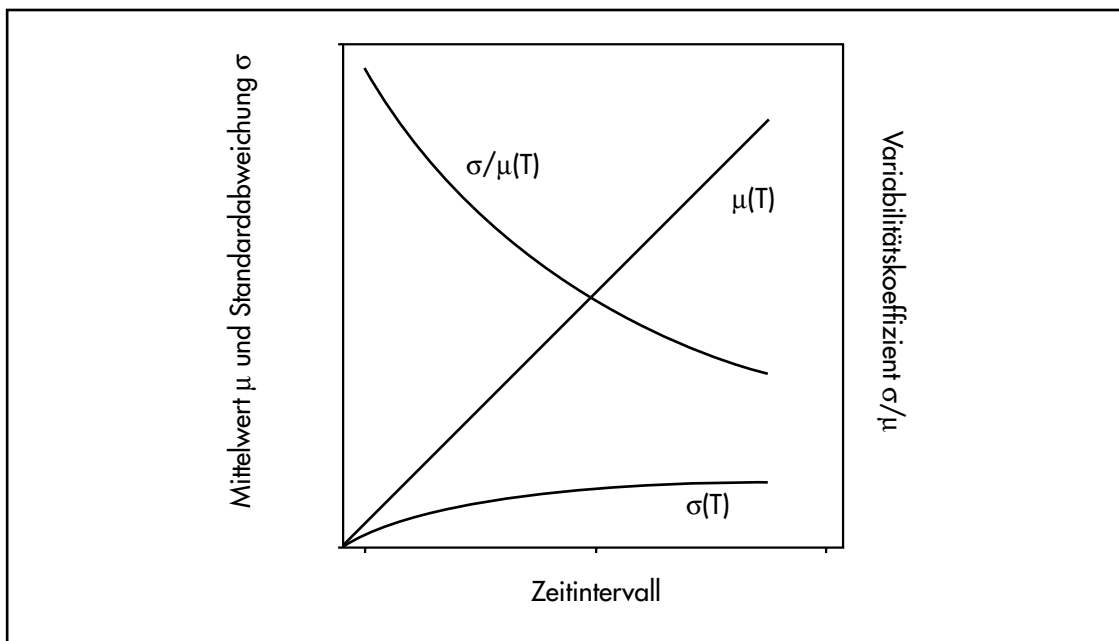


Abbildung 10. Das Verhältnis zwischen Mittelwert einer Zeitschätzung, $\mu(T)$, ihrer Streuung, $\sigma(T)$, und dem Variabilitätskoeffizienten, $\sigma(T)/\mu(T)$, unter Annahme eines Poissonprozesses.

Die für den Schrittmacher angenommene Poisson-Varianz steht indes im Widerspruch zu den Daten, die Gibbon (1971, 1977) für die Entwicklung der *scalar timing theory* herangezogen hat und in denen ein eher proportionales (skalares) Verhältnis zwischen der Streuung und dem Mittelwert der Zeitschätzung ($\sigma \sim \mu$) beobachtet wurde. Im Unterschied zur Poisson-Varianz bleibt bei der skalaren Varianz der relative Grad der Ungenauigkeit einer Zeitschätzung bezogen auf unterschiedliche Zeitintervalle konstant. Killeen (1999, p. 278) kommentiert dieses Problem wie folgt:

The Poisson system – the worst possible constant-rate pacemaker and the best possible counter – is mathematically a relatively simple model. That is why it is used. It is a subset of recurrent processes; you can replace the Poisson emitter with a more accurate oscillator, and the relative accuracy will improve further. But it cannot get worse. That is also the bad news, because when animals time intervals, their accuracy does not increase as the inverse square root of the interval to be timed. In fact their relative accuracy is relatively constant. This is Weber's law. It is also a keystone of scalar expectancy theory (SET). So, whereas the Poisson system is a good way to model time, it is a bad way to model animals that time. To do that, the clock has to be detuned.

Im Rahmen der *scalar timing theory* sind zwei Wege entwickelt worden, um dieses Problem zu lösen. Einerseits wird angenommen, daß zusätzlich zur Variabilität des Schrittmachers weitere Varianzquellen existieren, die *in der Summe* die beobachtbare Varianz erklären (Gibbon, 1991, p. 29). Gibbon führt in einer späteren Arbeit genauer aus (Gibbon, 1992, p. 293):

Scalar variance is induced by randomizing the Poisson mean with bias, or encoding the retrieval variance in the memory system. The components of variance multiply the representation of criterion times and hence induce the scalar property.

Andererseits soll die Frequenz des Schrittmachers *von Versuchsdurchgang zu Versuchsdurchgang* variieren können (Gibbon & Church, 1984, p. 477). Sind diese Schwankungen normalverteilt, könnte allein durch die Funktionsweise der inneren Uhr ein proportionales (skalares) Beurteilen von Zeitintervallen produziert werden (ebd.). Welche dieser beiden Möglichkeiten die wahrscheinlichere ist, wird durch die *scalar timing theory* allerdings nicht geklärt (Wearden, 1999, p. 8).

Die *behavioral theory of timing* (Killeen & Fetterman, 1988) erklärt das proportionale Anwachsen der Variabilität von Zeitschätzungen durch einen Wechsel in der Frequenz des Schrittmachers. Diese sei direkt kontrolliert durch die Häufigkeiten der in einem Experi-

ment dargebotenen Verstärkungen. Je länger das Verstärkungsintervall, desto langsamer läuft der Schrittmacher, so daß unterschiedlich lange Verstärkungsintervalle durch dieselbe Anzahl von Impulsen repräsentiert werden. Das diskriminatorische Potential eines Impulses läßt folglich bei längeren Verstärkungsintervallen nach, die Zeitschätzung wird ungenauer.

Variabilität des Akkumulators

Die *behavioral theory of timing* (Killeen & Fetterman, 1988) beschreibt als einzige neben einem stochastischen Impulsgenerator eine von diesem unabhängige, zufallsbedingte Fehlerhaftigkeit des Akkumulators. Fehler in der Akkumulation von Impulsen können u. a. dadurch entstehen, daß einzelne Impulse nicht registriert oder doppelt gezählt werden (Fetterman & Killeen, 1990, p. 778). Killeen und Fetterman nehmen als Fehlerquelle des Impulsgenerators eine Poissonverteilung der Häufigkeit abgegebener Impulse an, für den Akkumulator hingegen ein proportionales Anwachsen der Varianz mit dem Quadrat der Anzahl akkumulierter Impulse (Fetterman & Killeen, 1990, p. 779).

Variabilität des Schalters

Der Funktionsweise des Schalters, der im Rahmen der *scalar timing theory* den Schrittmacher mit dem Akkumulator verbindet, entspricht es ebenfalls, einen Beitrag zur empirischen Variabilität beizusteuern. Da sich der Schalter nicht synchron mit Beginn und Beendigung des zu beurteilenden Stimulus schließt und öffnet, sondern erst mit gewisser Latenz, können zufällige Variationen der Latenz die Beurteilung des Zeitintervalls verzerren. Allerdings gibt es keinen Grund für die Annahme, daß die Schalterlatenz mit der Stimulusdauer systematisch variiert. Da deshalb die durch den Schalter verursachte Variabilität nicht proportional mit dem Zeitintervall ansteigen sollte, kann die Variation der Schalterlatenz als konstanter Fehler angesehen werden (vgl. Gibbon, 1991, p. 27; Wearden, 1999, p. 8).

Reduziert man den Schalter auf seine Funktion der Initiierung und Beendigung der Abbildung der Dauer eines externen Signals und läßt das metaphorische Bild eines sich öffnenden oder schließenden Apparates beiseite, findet man auch z. B. bei Kristofferson (1977) einen ähnlichen Prozeß, der die Transformation eines externen Signals in eine interne Dauer regelt. Kristofferson postuliert, daß der Beginn eines Signals ein internes Ereignis mit gewisser Latenz verursacht, ebenso wie die Beendigung des Signals ein zweites internes Ereignis zur Folge hat. Die Annahme von Verzögerungen (Latenzen) im Enkodierungsprozeß der Signaldauer entspricht also genau der in der *scalar timing theory* postulierten Schalterlatenz. Im Unterschied zu dieser wird die Latenz von Kristofferson (1977) hingegen als invariant betrachtet.

Variabilität der Gedächtnisrepräsentation

Die *scalar timing theory* (inklusive deren konnektionistischer Version; vgl. Church & Broadbent, 1990) scheint die einzige quantitative Zeit-Theorie zu sein, die eine Variabilität auf Seiten des Gedächtnisses postuliert. In ihr wird ein lineares Verhältnis zwischen physikalischer Zeit und deren subjektiver Repräsentation angenommen (Gibbon & Church, 1990). Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 11 wiedergegeben.

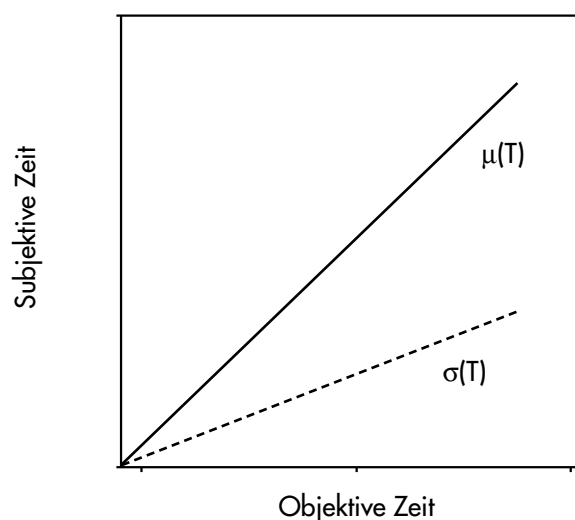


Abbildung 11. Zusammenhang zwischen objektiver Zeit einerseits und dem Mittelwert, μ , und der Standardabweichung, σ , subjektiver Zeit andererseits nach der *scalar timing theory* (nach Gibbon & Church, 1990).

Je länger das physikalische Zeitintervall, desto länger wird es im Mittel auch geschätzt. Gleiches, nur mit angenommener geringerer Steigung, gilt für die Streuung der subjektiven Schätzungen. Ein lineares Abbildungsverhältnis bedeutet, daß subjektive Zeit Intervallskalenniveau aufweisen muß, d. h. daß gleiche Differenzen auf Seiten der physikalischen Zeit auch gleichen Differenzen in der subjektiven Zeit entsprechen. Mögliche nicht-lineare Komponenten empirischer Zeitschätzungen sollten zufällig sein (Crystal, 2001, p. 36).

Ein linearer Zusammenhang zwischen physikalischer und subjektiver Zeit ist indes nicht der einzig mögliche monotone Zusammenhang. Ausnahmen von der Linearität werden bei der Beurteilung sehr kurzer Intervalle (Church, Getty & Lerner, 1976; Crystal, 1999; Fetterman & Killeen, 1992) wie auch bei der Beurteilung mittlerer (Crystal, 2001) und sehr langer Intervalle (Brunner, Kacelnik & Gibbon, 1992; Lejeune & Wearden, 1991; Zeiler, 1991) berichtet.

Variabilität zwischen den Versuchsdurchgängen und ein proportionales Anwachsen der Ungenauigkeit von Zeitschätzungen bei relativ langen Zeitintervallen können nach der *scalar timing theory* direkt auf die durch Variationen in der Enkodierung von Intervallen bedingten Repräsentation von Zeitintervallen als Verteilung von Zeit-Werten zurückgeführt werden (Gibbon & Church, 1990). Ferner kann der Wert der Gedächtniskonstanten k ebenfalls von Versuchsdurchgang zu Versuchsdurchgang variieren und wird von Gibbon (1991) als Enkodiergeschwindigkeit (*encoding speed*) bezeichnet.

This reference memory pattern is interpreted as a bias in the baud rate for transferring pulses from the clock stage to the memory stage, such that accumulator values are incorrectly scaled when they are transferred to reference memory. (Hinton & Meck, 1997, p. 434)

Da k ein Multiplikator ist, führen Variationen von k zu einem proportionalen Anwachsen der Variabilität bei steigenden Stimulusdauern.

Gallistel und Gibbon (2000) sehen auch in dem Abrufprozeß aus dem Gedächtnis eine mögliche Ursache für die empirische Varianz zwischen den Versuchsdurchgängen:

It has recently become clear that much of the observed trial-to-trial variability in response timing is due to the variability inherent in the signals derived from reading durations stored in long-term memory, rather than from variability in the timing process that generates inputs to memory. Even when there is only one such comparison duration in memory, a comparison signal, \hat{t}^ (die zu erinnernde Dauer; Anmerkung d. Verf.), derived from reading that one memory varies substantially from trial to trial. (p. 293)*

Allerdings ist die Gedächtnisvariabilität weder theoretisch noch empirisch von der Variabilität des Schrittmacher-Akkumulator-Systems zu trennen, da die im Gedächtnis repräsentierten Werte ihren Ursprung in eben diesem Schrittmacher-Akkumulator-System haben. "It should be remembered that while we speak of memory variance, we mean memory *or* clock variance, since these have the same trial-by-trial pattern" (Gibbon & Church, 1990; p. 44; Hervorhebung vom Autor).

Variabilität des Vergleichsprozesses

Schließlich kann das Vergleichsergebnis zwischen einem aktuellen Zeitintervall und einem gespeicherten Referenzwert von Versuchsdurchgang zu Versuchsdurchgang fluktuieren. Diese Fluktuation kann bedingt sein durch Variationen des jeweiligen Entscheidungskriteriums b^* , zu dem die beiden Zeitintervalle in Beziehung gesetzt werden.

Gibbon und Church (1990) argumentieren, daß auf der Verhaltensebene Variationen des Entscheidungskriteriums nicht von Variationen des Referenzintervalls zu unterscheiden seien, da beide zu einer proportionalen (skalaren) Variabilität der zeitbezogenen Reaktionen führten. Sie begründen ihr Argument dadurch, daß die Entscheidungsregel (hier in leicht veränderter Form):

$$(t - s) / s \geq b$$

äquivalent zu

$$t \geq (1 + b) s$$

sei (Gibbon & Church, 1990, p. 32). Setzt man die wahrgenommene Dauer t ins Verhältnis zu dem mit $(1 + b)$ gewichteten Standard s , ist in der Tat nicht zwischen einer Variation von b oder einer Variation von s zu differenzieren. Allerdings scheint diese Argumentation zumindest unvollständig. Betrachten wir die von Church und Gibbon (1982) entwickelte, ursprüngliche Entscheidungsregel:

$$|(s - t)| / s < b.$$

Wenn $s > t$, dann resultiert:

$$(s - t) / s < b,$$

und daraus:

$$s - t < b s,$$

und folglich:

$$t > (1 - b) s.$$

Ist hingegen $s < t$, dann folgt:

$$(t - s) / s < b,$$

und:

$$t - s < b s,$$

und schließlich:

$$t < (1 + b) s.$$

Für alle s und t gilt daher:

$$(1 + b) s > t > (1 - b) s.$$

Verändert man in dieser Relation den Wert der Variablen b bei Konstanthaltung von s (was einer Variation des Entscheidungskriteriums entspricht), dann erhält man eine *symmetrische* Ausweitung des Gültigkeitsbereiches von t , also in demselben Maße für Werte kleiner t wie auch für Werte größer t ; denn $(1 + b)$ wird bei Variation von b um den gleichen Betrag größer wie $(1 - b)$ kleiner wird (für alle $b > 0$). Behält man hingegen b konstant und variiert nur s (was einer Variation des Referenzintervalls entspricht), so führt dies zu einer *asymmetrischen* Ausweitung des Gültigkeitsbereichs. Gesetzt den Fall, daß s symmetrisch um seinen wahren Wert s_T fluktuierte, d. h. von Versuchsdurchgang zu Versuchsdurchgang

mit gleicher Wahrscheinlichkeit Werte $> s_T$ als auch Werte $< s_T$ aufträten. Da b praktisch > 0 ist, folgt daraus, daß eine relative Verringerung von s zu einer relativ geringfügigen Ausweitung des Gültigkeitsbereichs von t in Richtung von Werten $< s_T$, eine relative Vergrößerung von s hingegen zu einer relativ großen Ausweitung des Gültigkeitsbereichs von t in Richtung von Werten $> s_T$ führte. Insgesamt bedeutet dies, daß eine symmetrische Variation von s um einen wahren Wert s_T insofern zu einer asymmetrischen Ausweitung des Gültigkeitsbereichs von t führte, als eine Zunahme der (symmetrischen) Variation von s eine stärkeren „Verschiebung“ des Gradienten nach rechts nach sich zöge.

Bezieht man also – im Unterschied zu Gibbon und Church (1990) – die Größenrelation zwischen s und t auf das Vergleichsergebnis ein, dann folgt daraus, daß sich eine Variation des Entscheidungskriteriums auf das zeitbezogene Verhalten anders auswirken sollte als eine Variation des Referenzintervalls.

Fluktuationen des Entscheidungskriteriums zwischen den Versuchsdurchgängen müssen hingegen nicht die alleinige Ursache eines variablen Vergleichsprozesses sein, sondern sind möglicherweise auch motivational bedingt. Wearden und Culpin (1998) manipulierten in einem Generalisationsexperiment das Verhalten der Versuchspersonen durch Einführung einer Belohnungsstruktur. In der Kontrollgruppe wurde eine korrekte Identifizierung der 500 ms-Standarddauer (Treffer) mit fünf Punkten belohnt, während die korrekte Zurückweisung von Vergleichsdauern mit zwei Punkten belohnt wurde. Sowohl für falsche Zurückweisungen der Standarddauer als auch für fälschliche Identifizierungen von Vergleichsdauern als Standarddauer (falsche Alarme) wurde ein Punkt abgezogen. Für die beiden Experimentalgruppen war die Belohnungsstruktur identisch bis auf den Umstand, daß in Experimentalgruppe 1 die fälschliche Identifizierung des 400 ms-Vergleichsintervalls und in Experimentalgruppe 2 die fälschliche Identifizierung des 600 ms-Vergleichsintervalls als Standarddauer mit einem Abzug von fünf Punkten bestraft wurde. Die Manipulation führte dazu, daß in den Experimentalgruppen dasjenige Intervall signifikant seltener als Standard beurteilt wurde, bei dem mit einer Strafe zu rechnen war.

Kristofferson (1977, 1990) betrachtet das Entscheidungskriterium (*threshold for duration*) als die einzig variable Größe in der Beurteilung von Zeitintervallen. Das Entschei-

dungskriterium ist gleichzeitig auch der interne Standard (*real-time criterion*), mit dem die Dauer dargebotener Signale verglichen wird. Der interne Standard ist nicht konstant, sondern kann zwischen Versuchsdurchgängen variieren. “Variable error and the size of the duration threshold are determined solely by variability in the internal interval (...)” (Kristofferson, 1977, p. 106). Die Variabilität des Kriteriums verteilt sich als Dreiecksfunktion (*triangular distribution*) um einen Mittelwert. Die Streuung der Verteilung ist determiniert durch das Zeitquantum q (s. o.): $SD = q/\sqrt{6}$.

Der Einfluß nichtzeitlicher Variablen auf Zeitschätzungen

Quantitative Zeittheorien wie z. B. die *scalar timing theory* beschreiben und erklären die Verarbeitung von Zeitintervallen *losgelöst* von den nicht-zeitlichen Eigenschaften der Stimuli, deren Dauer beurteilt werden soll.

Einen Beleg für die Abstraktheit temporaler Information liefern Experimente, in denen die Versuchsteilnehmer einen Transfer durchführen mußten. „Man spricht von Transfer (Übertragung), wenn ein früherer Lernprozeß einen späteren erleichtert“ (Fraisse, 1966, S. 198). Häufig wird in Transferdesigns die Leistung einer in Trainingsphase (Aufgabe A) mit der Leistung in einer anschließenden Testphase (Aufgabe B) verglichen (vgl. Cormier & Hagman, 1987; Singley & Anderson, 1989). Ein solches Transferexperiment mit Zeit als abhängiger Variable führten Warm, Stutz und Vassolo (1975) durch. Sie ließen Versuchspersonen Zeitintervalle diskriminieren. Die Hälfte der Versuchspersonen trainierte mit akustischen Stimuli und wurde anschließend mit optischen Stimuli getestet, bei der anderen Hälfte verlief es genau umgekehrt. Für beide Modalitäten ergaben sich symmetrische Transfereffekte. Ein anderes Beispiel für die Abstraktheit subjektiver Zeit stammt von Meck und Church (1982). Sie ließen Ratten in einer Modalität (visuell oder auditiv) zwei Dauern voneinander unterscheiden lernen, überprüften die erlernte Fähigkeit in der jeweils anderen Modalität und beobachteten ebenfalls einen crossmodalen Transfer.

Die Ergebnisse dieser beiden Studien stimmen mit der Konzeptionalisierung subjektiver Zeit in quantitativen Theorien überein. Allerdings finden sich in der Empirie auch zahlreiche Beispiele für Faktoren, die über die objektive Zeit hinaus die Zeitschätzung beeinflussen. Die Effekte vier solcher Faktoren werden im folgenden beschrieben: die *nichtzeitlichen Eigenschaften von Stimuli*, der *Kontext* der Zeitschätzung, die auf den Zeitschätzungsprozeß gerichtete *Aufmerksamkeit* sowie die *Modalität* der Zeitschätzung.

Die Stimulusabhängigkeit von Zeitschätzungen

Es gibt zahlreiche Untersuchungen, die nahelegen, daß identische Zeitintervalle als unterschiedlich beurteilt werden, wenn sich die das Intervall definierenden Stimuli hinsichtlich ihrer nichtzeitlichen Eigenschaften unterscheiden. Zu diesen nichtzeitlichen Eigenschaften zählen z. B. die Struktur des Intervalls (gefüllt versus nicht gefüllt) und die physikalischen Eigenschaften der Markierungsstimuli (bspw. Intensität, Frequenz).

Das filled-duration-Phänomen

Die Beurteilung einer Dauer bezieht sich immer auf ein konkretes Ereignis, das durch einen eindeutigen Anfang und ein ebenso eindeutiges Ende definiert ist. Anfang und Ende des Ereignisses scheinen demnach für die Zeitschätzung die beiden einzig relevanten Stimuli zu sein. Indes ist es nicht unerheblich, ob innerhalb des zu beurteilenden Intervalls ein externer Stimulus vorhanden ist oder nicht. Ein Intervall, dessen Inhalt von einer externen Stimulation ausgefüllt wird, wird üblicherweise als *gefülltes* Intervall (*filled interval*) bezeichnet. Der Inhalt des Intervalls kann z. B. ein kontinuierlicher Ton oder eine Serie aufeinanderfolgender Klickgeräusche sein. Existiert hingegen zwischen Anfang und Ende des Intervalls keine externe Stimulation, spricht man von einem *leeren* Intervall (*empty interval*). Das Intervall wird in diesem Fall nur durch den wahrnehmbaren Anfangs- und Endpunkt definiert.

Ein gefülltes Intervall wird in der Regel als länger beurteilt als ein physikalisch gleich langes leeres Intervall (z. B. Buffardi, 1971; Ornstein, 1969; Roelofs & Zeeman, 1961). Dieser Befund ging als *filled-duration illusion* in die Literatur ein. Je mehr Inhalt (also z. B. je mehr Klickgeräusche) ein Intervall enthält (Ornstein, 1969) oder je komplexer der Inhalt ist (Ornstein, 1969; Schiffman & Bobko, 1974), als desto länger wird das Intervall geschätzt. Ein weiterer Aspekt der *filled-duration illusion* betrifft die Diskriminierbarkeit der Intervalle. Rammsayer und Lima (1991) sowie Rammsayer und Skrandies (1998) zeigten, daß gefüllte

Intervalle besser diskriminiert werden als leere Intervalle, wenn sie sehr kurz (50 ms) sind. Grondin (1993) hingegen fand einen Diskriminationsvorteil leerer gegenüber gefüllten Intervallen, wenn die Markierungsreize des leeren Intervalls optisch waren. Auch die Dauer der Markierungsreize bestimmt, ob und in welcher Richtung sich ein Diskriminationsunterschied zwischen leeren und gefüllten Intervallen abzeichnet (Kato & Tsuzaki, 1994).

Wie läßt sich das Phänomen durch das Modell der inneren Uhr erklären? Die Schwierigkeit besteht darin, daß in Uhrmodellen in der Regel keine expliziten Aussagen über nichtzeitliche Eigenschaften von Reizen getroffen werden. Dennoch ist eine Interpretation möglich. Man kann z. B. annehmen, daß bei einem gefüllten Intervall die innere Uhr (wegen der Kontinuität des Signals) zusätzlich stimuliert und dadurch beschleunigt würde. Sie sendete dann mehr Impulse pro Zeiteinheit aus, was wiederum zu einer Verlängerung der subjektiven Dauer führte. Eine höhere Impulsrate könnte überdies auch zu einer feineren zeitlichen Auflösung des Intervalls und damit zu einer besseren Diskriminierbarkeit führen. Diesen Ansatz vertreten z. B. Rammsayer und Lima (1991). Sie bieten darüber hinaus eine zweite Erklärung an. Ein leeres Intervall enthält doppelt so viel distinkte Ereignisse wie ein gefülltes Intervall. Dies hat zur Folge, daß der Schalter bei einem leeren Intervall – statt wie bei einem gefüllten Intervall – nicht jeweils nur einmal schließt (bei Beginn des Signals) und einmal öffnet (bei Beendigung des Signals), sondern insgesamt zweimal schließen und zweimal öffnen muß. Diese komplexere Arbeitsweise des Schalters sollte nach Rammsayer und Lima zu einer höheren Fehleranfälligkeit neigen, und folglich sollte die Diskrimination leerer Intervalle fehlerbehafteter sein als die von gefüllten Intervallen.

Grondin dagegen (1993) verweist auf unterschiedliche sensorische Charakteristika von gefüllten und leeren Intervallen. Möglicherweise erzeugt eine kontinuierliche Stimulation andere sensorische Spuren auf früher Wahrnehmungsebene und wird zu einem anderen Zeitpunkt vom sensorischen Apparat entdeckt als zwei zeitlich getrennte Stimulationen. Diesbezügliche sensorische Differenzen sollten auch zu unterschiedlich hoher Diskriminierbarkeit der Intervalle führen.

Die physikalischen Eigenschaften der Stimuli

Allan und Kristofferson (1974) berichten in einer Literaturübersicht von dem Fehlen einer Abhängigkeit zwischen der Diskrimination einer Dauer und den physikalischen Eigenschaften der Markierungsstimuli (z. B. Intensität, Frequenz). Auf der Grundlage einiger Studien (Abel, 1972a, b; Carbotte & Kristofferson, 1973; Nilsson, 1969) kommen sie zu dem Ergebnis, daß eine Wirkung der Markierungsstimuli vernachlässigt werden könne, solange die Stimuli eindeutig zu entdecken und die zu diskriminierenden Intervalle länger als 100 ms seien. Sie schließen daraus, daß die Beurteilung einer Dauer allein auf Grundlage eines zentralen Zeitmechanismus zustande kommen müsse.

Durch eine Vielzahl neuerer empirischer Daten muß allerdings die Interpretation von Allan und Kristofferson (1974) angezweifelt werden. So wurde verschiedentlich festgestellt, daß sowohl die Frequenz als auch die Intensität akustischer Markierungsstimuli durchaus die Diskriminierbarkeit von Zeitintervallen beeinflussen (vgl. Allan, 1984; Divenyi & Danner, 1977; Divenyi & Sachs, 1978; Grondin & Rousseau, 1991; Hirsh, Bilger & Deatherage, 1956; Penner, 1976). Selbst die Farbe der Reize scheint die Diskrimination der Dauer zu beeinflussen (Kraemer, Randall & Brown, 1997). Bei leeren Intervallen existiert ein Einfluß der Dauer der Markierungsreize auf die Diskriminierbarkeit eines Intervalls (Rammsayer & Leutner, 1996) und auf die Länge der wahrgenommenen Dauer (Grondin, Ivry, Franz, Perreault & Metthé, 1996; Woodrow, 1928). Boltz (1992) zeigte, daß die Struktur eines akustischen Signals die retrospektive Beurteilung seiner Dauer beeinflusst.

Der Kontext von Zeitschätzungen

Einflüsse der Qualität von Zeitintervallen auf die Zeitschätzung lassen sich durchaus mit der Hypothese der inneren Uhr vereinbaren, insofern eine Modulierung der Impulsfrequenz bzw. eine zeitweise Unterbrechung des Akkumulationsprozesses durch Aufmerksamkeitsschwankungen zugrundegelegt wird. Stimuluseffekte sind jedoch auch aus ande-

rer Perspektive interpretiert worden. Während in quantitativen Theorien zur Zeitwahrnehmung subjektive Zeit als quasi-sensorisches Phänomen aufgefaßt wird, wurde mit Ornstein (1969) eine alternative Sichtweise eingeführt. Rückgreifend auf das Paradigma der menschlichen Informationsverarbeitung nahm Ornstein an, daß die Beurteilung eines Intervalls durch Gedächtnisinhalte determiniert würde. Ornsteins zentrale Hypothese besagt, daß die Erfahrung von Dauer eine Konstruktion sei, die durch die (Menge bzw. Komplexität der) Inhalte, die während dieser Dauer wahrgenommen bzw. gespeichert worden sind, bestimmt werde. Für die subjektive Dauer gelte daher, daß je mehr Ereignisse innerhalb eines Zeitintervalls stattfänden, desto mehr Platz (*storage size*) für die Speicherung dieser Ereignisse bzw. für das Zeitintervall benötigt würde. Daraus folge, daß je größer die *storage size* sei, desto länger die Erfahrung der Dauer werde – unabhängig von der physikalischen Dauer.

Prototypisch für das Ornsteinsche Verständnis von subjektiver Dauer ist ein Experiment (Ornstein, 1969, Experiment Nr. 1), in dem Versuchspersonen drei unterschiedlich strukturierte, aber physikalisch gleich lange (9.33 min) akustische Stimuli dargeboten wurden, deren Inhalt aus einer Folge von einzelnen Tönen bestand. Die Stimuli unterschieden sich ausschließlich hinsichtlich der Anzahl der dargebotenen Töne (40/min, 80/min und 120/min). Tatsächlich unterschätzten die Versuchspersonen die Dauer der dargebotenen Stimuli in Abhängigkeit von der Anzahl der Töne: Je geringer die Anzahl der Töne, desto kürzer erschien ihnen das Intervall (bei 120/min betrug die mittlere geschätzte Dauer des Intervalls 96.5% der tatsächlichen Dauer; bei 80/min 85.6%; und bei 40/min 68.8%).

Das Ornsteinsche Modell wurde vor allem wegen seiner Einfachheit kritisiert (Block, 1974, 1978, 1982, 1985, 1989a, 1989b; Block & Reed, 1978). Block und Mitarbeiter argumentierten, daß das Gedächtnis nicht bloß etwas speichere (*to store*), sondern sich ständig in Relation zur Umwelt verändere. Ferner sei Ornsteins Modell lediglich ein *stimulusbasierter* Ansatz, der über den einzelnen Stimulus hinausgehende Veränderungen nicht berücksichtige. In einer frühen Untersuchung fanden Block und Reed (1978), daß die erinnerte Dauer sich auch dann verlängerte, wenn die Anzahl der Ereignisse konstant blieb, Veränderungen aber in der Aktivität oder Strategie der Versuchspersonen, die Inhalte eines Ereignisses wahrzu-

nehmen, stattfanden. Dieser Befund führte zur *Kontext-Veränderungs-Hypothese* (*contextual change hypothesis*): Die erinnerte Dauer eines Ereignisses wird determiniert durch die kognitive Rekonstruktion kontextueller Information als Teil des betreffenden Ereignisses. Je größer die erinnerbaren Veränderungen des Kontextes, desto länger die erinnerte Dauer (Block, 1990, pp. 24-25). Der Begriff „Kontext“ beinhaltet dabei sowohl die Situation, in der ein Ereignis ursprünglich wahrgenommen wurde, als auch die Situation, in der die Ereignisdauer erinnert werden soll. Zu den Kontextfaktoren, welche im einzelnen (und in Wechselwirkung miteinander) die Beurteilung von Zeitintervallen determinieren, zählt Block (1) die Methode der Zeitbeurteilung (z. B. die Reproduktion von Zeitintervallen), (2) die Inhalte der zu beurteilenden Zeitperiode (z. B. die Anzahl von Veränderungen, die Modalität und Komplexität von Ereignissen), (3) die Eigenschaften des Beurteilers (z. B. Geschlecht, Vorerfahrungen, Interessen) sowie (4) dessen Aktivitäten während der betreffenden Zeitperiode (z. B. Informationsverarbeitungsstrategien und die Richtung der Aufmerksamkeit).

Block (1990, p. 25) diskutiert zwei Versionen dieses Modells. Zum einen läßt sich die Anzahl von Kontextassoziationen (*contextual associations*), die mit dem memoriertem Ereignis verknüpft sind, als kritischer Faktor für das Ausmaß der erinnerten Dauer betrachten. Diese Interpretation kann allerdings Befunde von Untersuchungen nicht erklären, in denen Versuchspersonen die Dauer eines Ereignisses, in denen häufig Veränderungen stattfanden, als kürzer beurteilten als Ereignisse, in denen relativ wenige Veränderungen vorkamen (vgl. Block, 1986). Zum anderen können Kontextveränderungen ganz allgemein (*overall change in context*) die Erinnerung an eine Dauer beeinflussen, ohne daß eine bestimmte Richtung des Einflusses festgelegt werden muß. Neben der Unbestimmtheit dieser Hypothese stellt Block (1990, pp. 26-27) zwei weitere Probleme dar. Einerseits sieht er keine Möglichkeit, die Veränderung des Kontextes zu quantifizieren. Andererseits sei es schwierig zu bestimmen, welcher kognitive Prozeß die Erinnerung von Kontextveränderungen ermögliche.

Den von Block ins Feld geführten Problemen sollen drei weitere hinzugefügt werden:

1 Sowohl das *storage size*-Modell von Ornstein (1969) als auch das *contextual*

change-Modell von Block (1989a, 1989b, 1990) erlauben nur die Erklärung von *retrospektiven* Zeitschätzungen, also von Zeitschätzungen, die nicht *während* einer zu beurteilenden Zeitperiode, sondern erst *danach* stattfinden. Im Gegensatz zu retrospektiven Zeitschätzungen werden Versuchspersonen bei *prospektiven* Schätzmethoden darüber informiert, daß von ihnen ein Urteil über ein bestimmtes Intervall erwartet wird.

Die retrospektive Schätzung der Dauer wird zurückgeführt auf die *Rekonstruktion vergangener Veränderungen*. Die erlebte Dauer entspringt aber gerade nicht der Wahrnehmung bzw. Erinnerung von Veränderungen, sondern von temporalen *Invarianzen*. Der Rückschluß von der Veränderung auf die Dauer kann daher nur unter Mitwirkung einer kognitiven Inferenz unter Einbezug anderer Parameter wie z. B. der Geschwindigkeit der Ereignisse möglich sein, da sich aus der Anzahl der Veränderungen allein kein direkter Bezug zur Dauer herstellen läßt. Insofern scheint das retrospektive Beurteilen von Zeitintervallen etwas grundsätzlich anderes zu sein als das prospektive Beurteilen (vgl. Boltz, Kupperman & Dunne, 1998; McClain, 1983; Zakay, 1993a, b), bei dem – unter Annahme des Modells der inneren Uhr – die Dauer eines Ereignisses durch die Impulssumme eines im Mittel gleich getakteten Impulsgebers abgebildet wird.

Da stimulus- oder ereignisbasierte Modelle die Annahme einer inneren Uhr (weitgehend) ablehnen, wird in ihnen die Beurteilung einer Dauer auf „kontextuale“ (Block, 1989a) oder andere Veränderungen zurückgeführt. Auch diese Veränderungen müssen von irgendeiner Instanz gezählt werden, damit ein Zeitintervall hinsichtlich seines Ausmaßes bestimmt werden kann (vgl. auch Poynter, 1989). Dennoch bleiben diese Modelle die Antwort schuldig, in welcher Form ein Transformationsprozeß existiert, der angibt, wie non-temporale Informationen (wie die Anzahl von Ereignissen) in temporale „übersetzt“ werden sollen.

Zeitschätzung und Aufmerksamkeit

Während bei retrospektiven Zeitbeurteilungen die geschätzte Zeit anwächst, je mehr Informationen in der betreffenden Zeitperiode verarbeitet wurden (vgl. Ornstein, 1969; Zakay, 1989), scheint sich diese Beziehung im prospektiven Design gerade umzukehren. Bereits Burnside (1971) stellte fest, daß Zeitintervalle als kürzer beurteilt werden, wenn *gleichzeitig* eine andere Aufgabe durchgeführt wird, und schloß daraus, daß die geschätzte Zeit in dem Maße abnimmt, in dem die Menge an zusätzlich zu verarbeitender Information ansteigt (p. 405). Diese negative Beziehung zwischen dem Wert subjektiver Zeit und der Zuwendung zu einer konkurrierenden Aufgabe wurde vielfach bestätigt (z. B. Curton & Lordhal, 1974; Fortin & Rousseau, 1987). Ein anschauliches Beispiel liefert das sog. *watched-pot*-Experiment (Block, George & Reed, 1980; Cahoon & Edmonds, 1980). Während eine Gruppe von Versuchspersonen instruiert wurde, auf den Beginn des Kochens des Wassers zu warten und die zu verstreichende Zeit zu schätzen (prospektive Bedingung), wurde eine andere Gruppe nicht instruiert, die Zeit zu schätzen (retrospektive Bedingung). Auf Grund der Instruktion sollten die Versuchspersonen der prospektiven Bedingung verstärkt den Verlauf der Zeit beachten. Bei der anschließenden Zeitbeurteilung schätzten die Versuchspersonen der prospektiven Bedingung die Dauer bis zum Beginn des Kochens länger als die Versuchspersonen der retrospektiven Bedingung. Der in diesen Untersuchungen aufgetretene zentrale, die Zeitschätzung beeinflussende Faktor ist die Zuwendung von *Aufmerksamkeit* auf die Dauer des zu beurteilenden Ereignisses. Werden unter retrospektiven Bedingungen Zeitintervalle geschätzt, stützt sich das Urteil eher auf die Rekonstruktion des Ereignisses in der betreffenden Zeitperiode (Ornstein, 1969; Block, 1990). Hingegen scheint in prospektiven Bedingungen die Zuwendung von Aufmerksamkeit essentiell zu sein.⁴

⁴ Ob Zeit ohne Zuwendung von Aufmerksamkeit verarbeitet werden kann, wird unterschiedlich diskutiert. Hintzman, Summers und Block (1975) z. B. nehmen an, daß die Dauer von Ereignissen auch automatisch als Bestandteil der Gedächtnisspur eines Ereignisses verarbeitet und gespeichert werden kann (vgl. auch Hasher & Zacks, 1979). Befunde, in denen die intentionale, aufmerksame Verarbeitung zeitlicher Information einen Vorteil gegenüber der inzidentellen Verarbeitung erbrachte, widersprechen jedoch der Annahme einer grundsätzlich automatischen temporalen Informationsverarbeitung (Jackson, 1985; Michon & Jackson, 1984).

Aufmerksamkeit wird meist als beschränkte kognitive Ressource betrachtet, die auf die zu leistenden Verarbeitungsschritte aufgeteilt werden muß (Baddeley, 1986; Johnston & Heinz, 1978; Kahnemann, 1973; Wickens, 1980). Demnach kann auch die Verarbeitung zeitlicher Information als ein aufmerksamszehrender Prozeß verstanden werden, der mit anderen, parallel stattfindenden Prozessen um die Zuteilung der Ressource Aufmerksamkeit konkurrieren muß. Um Theorien zu testen, in denen ein Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Zeitschätzung behauptet wird, wurden meist sog. *dual-task*-Aufgaben verwendet. In diesen werden Versuchspersonen instruiert, zwei Aufgaben – eine zeitbezogene und eine nicht-zeitbezogene – gleichzeitig durchzuführen. Beispielsweise sollten Versuchspersonen Karten sortieren (Hicks, Miller, Gaes & Bierman, 1977; Hicks, Miller & Kinsbourne, 1976), die Intensität eines visuellen Stimulus beurteilen (Macar, Grondin & Casini, 1994) oder Wörter klassifizieren (Macar, 1996; McClain, 1983), während sie simultan die Dauer dieser Aufgabe zu beurteilen hatten. Je mehr Aufmerksamkeit einer Aufgabe zugewendet wird, desto besser sollte auch die Leistung bezüglich dieser Aufgabe sein. Tatsächlich zeigte sich meist, daß subjektive Zeit negativ mit der Anzahl nichtzeitlicher Aufgaben korreliert, die während der betreffenden Zeitperiode durchgeführt werden (z. B. Hicks et al., 1976; Zakay, 1993a). Wird keine oder wenig Aufmerksamkeit der zeitbezogenen Aufgabe entgegengebracht, werden Zeitintervalle in der Regel unterschätzt (Boltz, 1991; Brown, 1997; Fortin & Massé, 2000; Fortin & Rousseau, 1998; Macar et al., 1994; Mattes & Ulrich, 1998).

Auch die gleichzeitige Verarbeitung mehrerer Zeitintervalle führt zur Verringerung der aufgebrachten Aufmerksamkeit für jedes einzelne Intervall. In einer Untersuchung von Brown, Stubbs und West (1992) sollten Versuchspersonen die Dauer verschiedener, aber zum Teil gleichzeitig dargebotener Stimuli beurteilen. Im Vergleich zur Kontrollbedingung, in der nur ein einziges Intervall geschätzt wurde, zeigten die Versuchspersonen der Experimentalbedingung eine größere Variabilität in der Beurteilung der Zeitintervalle.

Das erste quantitative Modell zur Aufmerksamkeitsverteilung zwischen zeitbezogenen und nicht-zeitbezogenen Aufgaben entwickelten Thomas und Kollegen (Thomas & Brown, 1974; Thomas & Weaver, 1975). In diesem Modell gilt Aufmerksamkeit als limitierte

Ressource, die zwischen der Verarbeitung der Dauer eines Signals und dessen nichtzeitlichem Informationsgehalt aufgeteilt wird. Der Inhalt des Modells läßt sich durch folgenden mathematischen Ausdruck formalisieren:

$$\tau(I) = a f(t; I) + (1 - a) g^*(I).$$

Die wahrgenommene Dauer τ eines Ereignisses mit dem Inhalt I ist eine monotone Funktion der a -gewichteten Summe der Information, die von einem Timer $f(t, I)$ und von dem Stimulusprozessor $g^*(I)$ verarbeitet wird, wobei a Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Geht a gegen 1, wird mehr zeitliche Information verarbeitet als wenn a gegen Null tendiert; in diesem Fall steigt die verarbeitete Menge an nicht-zeitbezogener Information. Die grundsätzliche Vorhersage dieses Modells besteht darin, daß subjektive Zeit direkt bezogen ist auf die Aufmerksamkeit, die dem Zeitverarbeitungsprozeß zur Verfügung steht. Da Thomas und Mitarbeiter ähnlich wie Creelman (1962) und Treisman (1963) sich den Timer als ein Schrittmacher-Akkumulator-System vorstellen, wird postuliert, daß eine Verminderung der Zuwendung von Aufmerksamkeit auf den Zeitverarbeitungsprozeß zu einer verminderten Anzahl akkumulierter Impulse führt. Thomas und Weaver (1975) nehmen an, daß retrospektive Zeitschätzungen eher durch Rückgriff auf den Stimulusprozessor ermöglicht werden, wohingegen prospektive Schätzungen das Produkt des Schrittmacher-Akkumulator-Systems seien.

Das Modell von Thomas und Weaver (1975) diene späteren modifizierten Aufmerksamkeitsmodellen als Grundlage (z. B. Zakay, 1989). Als eine Brücke zwischen dem *scalar timing model* mit seinem Informationsverarbeitungsansatz (Church, 1984; Gibbon, 1991; Gibbon & Church, 1984; Gibbon, Church & Meck, 1984) und kognitiven Faktoren wie Aufmerksamkeit erweist sich das *attentional gate model* (Block & Zakay, 1996; Zakay & Block, 1996, 1998), indem es Eigenschaften von Thomas' Aufmerksamkeitsmodell und dem *scalar timing model* verbindet. Zakay und Block erweitern das skalare Zeitverarbeitungsmodell durch einen kognitiven Faktor, angesiedelt auf der Ebene der Uhr zwischen dem Schrittmacher (*pacemaker*) und dem Schalter (*switch*), das sog. *attentional gate* (Aufmerksamkeits-Tor). Das *attentional gate* öffnet sich, wenn der Verarbeitung von Zeit Aufmerksamkeit zu-

geteilt wird. Im Gegensatz zum Konzept des Schalters, den nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip entweder Impulse passieren oder nicht, kann das *attentional gate* graduell unterschiedlich weit geöffnet sein. Je weiter es geöffnet ist, desto mehr Impulse können in Richtung Akkumulator transferiert werden. Der Unterschied zwischen dem *attentional gate* und dem Schalter besteht ferner in der unterschiedlichen Definition von Aufmerksamkeit, die für beide Konzepte Bedingung ihrer Funktion ist (Lejeune, 1998, p. 136). Während das *attentional gate* für seine Öffnung Aufmerksamkeit im Sinne einer allgemeinen Zuweisung von kognitiven Ressourcen benötigt, erfordert die Schließung des Schalters (man beachte die Umkehrung der Tätigkeit trotz gleicher Funktion; d. Verf.), daß das Subjekt ein Signal erkennt, das ihm den Beginn des Zeitverarbeitungsprozesses bedeutet.

Ob die Erweiterung des Schalterkonzeptes durch das *attentional gate* einen Zugewinn an theoretischer Erklärungspotenz erbringt, wird zumindest kontrovers diskutiert (Lejeune, 1998; Zakay, 2000).

Der Modalitätseffekt bei Zeitschätzungen

Im Gegensatz zu konkreten Stimuluseigenschaften ist die Modalität strenggenommen keine Eigenschaft eines Ereignisses, sondern die *Art und Weise*, in der das Ereignis wahrgenommen wird. Modalität ist immer bezogen auf das Sinnesorgan, mit dem wahrgenommen wird. Ein und dasselbe Ding kann – unter Umständen – visuell, auditiv, taktil, olfaktorisch und gustatorisch wahrgenommen werden. Jede Wahrnehmungsmodalität spiegelt sowohl Eigenschaften des wahrgenommenen Objekts als auch Eigenschaften des Wahrnehmungsapparates wider.

Ergebnisse aus Untersuchungen zur menschlichen Zeiterfahrung zeigen, daß die Beurteilung der Dauer eines Ereignisses nicht nur durch dessen objektive Dauer determiniert ist, sondern ebenso von der Modalität, in welcher das Ergebnis wahrgenommen wird, beeinflusst wird. Zwei Merkmale zeichnen den Modalitätseffekt in der Zeitschätzung aus. Erstens werden optische Reize in der Regel als kürzer andauernd beurteilt als akustische Rei-

ze gleichen zeitlichen Ausmaßes (z. B. Goldstone, 1968a; Goldstone & Goldfarb, 1964; Goldstone & Lhamon, 1974; Sebel & Wilsoncroft, 1983; Stubbs, Dreyfus & Fetterman, 1984). Zweitens werden akustische Intervalle meist mit größerer Genauigkeit geschätzt als optische Intervalle (z. B. Collier & Logan, 2000; Glenberg, Mann, Altman, Forman & Procise, 1989; Grondin, Meilleur-Wells, Ouellette & Macar, 1998; Grondin & Rousseau, 1991; Rousseau & Rousseau, 1996; Wearden, Edwards, Fakhri & Percival, 1998).

Dennoch gibt es auch widersprechende Befunde. Hawkes, Bailey und Warm (1961) sowie Bobko, Thompson und Schiffman (1977) fanden keinen Unterschied in der Zeitschätzung zwischen auditiver und visueller Modalität. Buffardi (1971) untersuchte das sog. *filled-duration*-Phänomen anhand von akustischen, taktilen und optischen Reizen. Das Phänomen besteht darin, daß bei identischer Dauer ein Stimulus dann als relativ länger beurteilt wird, je mehr diskrete Elemente während seiner Darbietung auftreten. Das *filled-duration*-Phänomen trat in jeder Reizmodalität in gleicher Weise auf. Crowder und Greene (1987) fanden ebenso wie Schab und Crowder (1989) für leere Intervalle keinen Modalitätseffekt (siehe aber Schab & Crowder, 1989, Experiment 3, sowie Grondin, 1993).

Unterschiedliche Ansätze wurden entwickelt, um den Modalitätseffekt zu erklären. Goldstone und Lhamon (1971) zum Beispiel schlagen vor, daß auditiv-visuelle Differenzen durch modalitätsspezifische Eigenschaften der zentralen Informationsverarbeitung bedingt seien. Die Verarbeitung visueller Informationen erfordere eine höhere und abstraktere Verarbeitungsebene als die Verarbeitung auditiver Informationen; folglich sei die visuelle Informationsverarbeitung langsamer und ungenauer als die auditive Informationsverarbeitung.

Glenberg et al. (1989) betrachten Modalitätsunterschiede in der Zeitschätzung durch Enkodierungsprozesse verursacht. Die Enkodierung der Dauer eines Signals erfolge in erster Linie über den auditiven Kanal; daher erfordere die Enkodierung der Dauer eines optischen Signals zusätzliche Verarbeitungsschritte. Diese könnten auch verantwortlich für die unterschiedliche Genauigkeit zwischen der Schätzung einer auditiv oder visuell enkodierten Dauer sein, da sowohl der Beginn als auch die Beendigung eines zusätzlichen Prozesses

Schwankungen unterliegen und somit zu einer variableren Zeitschätzungen führen können.

Eine weitere Interpretationsmöglichkeit bietet die Annahme unterschiedlicher Variabilität in der Wahrnehmung der Signale selbst (Allan, Kristofferson, & Wiens, 1971; Grondin, 1993). Akustische Signale sollten (unabhängig von ihrer Dauer) exakter wahrgenommen werden können als optische Signale und somit auch besser hinsichtlich ihrer Dauer diskriminiert werden. Goldstone (1968b) berichtet von unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten auf Signale unterschiedlicher Modalität: Versuchspersonen konnten auf akustische Signale schneller reagieren als auf optische Signale.

Grondin und Rousseau (1991) untersuchten die Dauerdiskriminierung von multimodal dargebotenen kurzen, „leeren“ Zeitintervallen mit der *single stimulus*-Methode (vgl. Appendix 1). Sie fanden, daß sich die Leistung der Versuchspersonen bezüglich der Modalität unterschied: Intervalle, die durch Signale unterschiedlicher Modalität begrenzt wurden, wurden schlechter diskriminiert als Intervalle, die durch Signale derselben Modalität begrenzt wurden. Sie schlossen daraus, daß zwei Prozesse an der Verarbeitung von Zeitintervallen beteiligt seien: ein spezifischer Prozeß (*specific processor*), innerhalb dessen die Verarbeitung von Intervallen *einer* Modalität stattfindet, und ein aspezifischer Prozeß (*aspecific processor*), der für die Verarbeitung von Intervallen, begrenzt durch *unterschiedliche* Modalitäten, verantwortlich zeichnet. Während der aspezifische Prozeß als kontrollierter, Aufmerksamkeit erfordernder Prozeß charakterisiert werden könne, laufe der spezifische Prozeß in einem automatischen Modus. Folglich sei die Diskrimination von Intervallen unterschiedlicher Modalität fehleranfälliger, da Schwankungen in der Zuwendung von Aufmerksamkeit sich negativ auf die Verarbeitung von Zeitintervallen innerhalb des aspezifischen Prozesses auswirken könnten.

Die meisten der neuerlichen theoretischen Erklärungsansätze für den Modalitätseffekt sind in den theoretischen Rahmen der *scalar timing theory* eingebettet (Gibbon, 1991; Gibbon & Church, 1984). Daß visuell encodierte Intervalle kürzer als auditiv encodierte Intervalle geschätzt werden, wird nach dieser Theorie der in Abhängigkeit von der jeweiligen Modalität unterschiedlichen Geschwindigkeit der Impulsproduktion zugeschrieben

(Penney, Allan, Meck & Gibbon, 1998; Wearden et al., 1998). Wird die Zeit eines akustischen statt eines optischen Signals beurteilt, dann sollte der Schrittmacher mit erhöhter Frequenz Impulse aussenden. Folglich werden bei akustischen Signalen entsprechend mehr Impulse pro Zeiteinheit akkumuliert, was zu einem größeren Impuls-Wert für akustische Intervalle im Vergleich zu optischen Intervallen führt. Werden also akustische Signale mit optischen Signalen hinsichtlich ihres zeitlichen Ausmaßes verglichen, erscheint das akustische länger als das optische. Unterschiede in der Genauigkeit der Zeitschätzung in Abhängigkeit von der Modalität können durch differentielle, modalitätsspezifische Schwankungen in der Arbeitsweise des Schalters zwischen Schrittmacher und Akkumulator erklärt werden (vgl. Wearden, 1999; Wearden et al., 1998). Modalitätsabhängige Unterschiede in der Beurteilung von Zeitintervallen werden meistens durch die Annahme *eines* zentralen Schrittmacher-Akkumulator-Systems erklärt, dessen Arbeitsweise von der jeweiligen Sinnesmodalität beeinflusst wird. Nur wenige Autoren favorisieren die Idee *unterschiedlicher*, modalitätsspezifischer Akkumulatoren (z. B. Hocherman & Ben-Dov, 1979; Rousseau & Rousseau, 1996).

Zusammenfassung

Zwischen quantitativen Dauer-Diskriminationsmodellen und stimulus- bzw. ereignisbasierten Theorien zur Beurteilung von Zeitintervallen bestehen also mindestens hinsichtlich zweier Aspekte fundamentale Widersprüche:

- ¶ Quantitative Theorien gehen von der Existenz einer inneren Uhr aus, während ereignisbasierte Theorien diese weitgehend ablehnen.
- ¶ Quantitative Theorien führen die subjektive Beurteilung einer Dauer im wesentlichen auf die objektive (physikalische) Dauer eines Signals zurück, während ereignisbasierte Theorien den Einfluß nichtzeitlicher Variablen auf die Einschätzung einer Dauer in den Vordergrund stellen.

Tabelle 1 stellt in einer Übersicht eine Auswahl von Faktoren dar, deren Einfluß auf die subjektive Beurteilung von Zeitintervallen in empirischen Studien untersucht wurde.

Tabelle 1: Faktoren, deren potentieller Einfluß auf die subjektive Dauer untersucht wurde, mit zugehörigen Studien (Auswahl).

Ort der experimentellen Variation				
Methode	Reizeigenschaften	Bio-physiologische Bedingungen	Externe Faktoren	Kognitive Faktoren
Art der Zeitschätzung	Signaldauer	Körpertemperatur	Kontextuelle Veränderungen	Aufmerksamkeit
Allan, 1979; Block, 1989a; Carlson & Feinberg, 1968a, b, 1970; Doehring, 1961; Du Preez, 1963; Feinberg, 1968a, b; Fraisie, Bonnet, Gelly & Michaut, 1962; Goldfarb & Goldstone, 1963; Hawkes, Bailey & Warm, 1961; Hornstein & Rotter, 1969; Treisman, 1963; Zakay, 1990, 1993.	alle Untersuchungen	Hoagland, 1933; Lockhart, 1967.	Block, 1974, 1978, 1982, 1989a, b; Block & Reed, 1978.	Block, George & Reed, 1980; Boltz, 1991; Brown, 1997; Brown, Stubbs & West, 1992; Burnside, 1971; Cahoon & Edmonds, 1980; Curton & Lordhal, 1974; Falk & Bindra, 1954; Filer & Meals, 1949; Fortin & Massé, 2000; Fortin & Rousseau, 1987, 1998; Hicks et al., 1976, 1977; Macar, 1996; Macar, Grondin & Casini, 1994; Mattes & Ulrich, 1998; Zakay, 1993a, b; Zakay & Block, 1996.
	«Füllung» des Intervalls	Pharmakologische Substanzen	Zeit bis zum Abruf	
	Rammsayer & Lima, 1991; Rammsayer & Skrandies, 1998.	Frankenhaeuser, 1959; Hinton & Meck, 1997; Maricq et al., 1981; Meck, 1983, 1996.	Cabeza de Vaca et al., 1994; Fetterman, 1995; Grant & Kelly, 1996; Grant & Robinson, 1993; Grant & Spetch, 1991; Grant, Spetch & Kelly, 1997; Guay, 1982; Guay & Wilberg, 1983; McGavren, 1965; Spetch, 1987; Spetch & Rusak, 1989; Spetch & Wilkie, 1982, 1983; Wearden & Ferrara, 1993.	
	Komplexität des Stimulus	Alter		
	Ornstein, 1969; Schiffman & Bobko, 1974.	vgl. Metaanalyse von Block, Zakay & Hancock, 1999; McCormack, Brown, Maylor, Darby & Green, 1999.		
	Häufigkeit von Stimuli in einem Intervall	Geschlecht		
	Buffardi, 1971; Ornstein, 1969; Roelofs & Zeeman, 1961.	Carlson & Feinberg, 1970; Gullicksen, 1927.		
	Länge der Markierungsreize		Tageszeit	Übung
	Grondin, Ivry, Franz, Perreault & Metthé, 1996; Kato & Tsuzaki, 1994; Rammsayer & Leutner, 1996; Woodrow, 1928.		Evans, 1971; Meck, 1991; Thor, 1962.	Carlson & Feinberg, 1970.
	Akust. Frequenz		Akustischer und optischer Hintergrund	
	Allan, 1984; Divenyi & Danner, 1977; Divenyi & Sachs, 1978;		Hirsh, Bilger & Deatherage, 1956.	
			Reihenfolge der Reizdarbietung	
			Allan, 1977, 1984;	

Grondin & Rousseau, 1991;
Penner, 1976.

**Sequenz von
Klickgeräuschen**

Penton-Voak et al., 1996;
Treisman et al., 1990.

**Sequenz von
Lichtimpulsen**

Treisman & Brogan, 1992.

Visuelle Frequenz

Kraemer, Randall & Brown, 1997.

Modalität

Collier & Logan, 2000;
Glenberg, Mann, Altman, Forman & Procise, 1989;
Goldstone, 1968a;
Goldstone & Goldfarb, 1964;
Goldstone & Lhamon, 1974;
Grondin et al., 1998;
Grondin & Rousseau, 1991;
Rousseau & Rousseau, 1996;
Sebel & Wilsoncroft, 1983;
Stubbs, Dreyfus & Fetterman, 1984;
Wearden, Edwards, Fakhri & Percival, 1998.

Intensität

Divenyi & Danner, 1977;
Rammsayer, 1994.

Ereignisstruktur

Boltz, 1992;
Boltz et al., 1998.

Allan & Kristofferson, 1974;
Hellström, 1977;
Jamieson, 1977;
Jamieson & Petrusic, 1975a, b, 1976, 1978.

Der Anteil des Gedächtnisses am Modalitätseffekt

Modalitätsspezifische Repräsentationen

Den meisten Erklärungsansätzen für den Modalitätseffekt ist die Annahme gemein, daß der Grund für modalitätsspezifische Differenzen in der *frühen Verarbeitung* eines Zeitintervalls (z. B. Enkodierung) zu lokalisieren sei. Nur wenig Aufmerksamkeit wurde bislang auf die Frage gerichtet, ob die Dauer akustischer und optischer Reize unterschiedlich im Gedächtnis repräsentiert ist. Werden Zeitintervalle unterschiedlich enkodiert (z. B. in einem auditiven oder einem visuellen System), ist eine Äquivalenz zwischen auditiv enkodierten und visuell enkodierten Intervallen nicht mehr zwangsläufig gegeben. Unterschiedliche, modalitätsspezifische Codes für Zeitintervalle könnten folglich auch für deren Memorierung gelten.

It is likely that, for a series of time judgments on intervals marked by signals delivered from one given sensory mode, the representation of time is retained in memory space that is modality-specific. (Grondin, 2001, p. 37)

In einer Untersuchung von Hocherman und Ben-Dov (1979) beurteilten Versuchspersonen Paare von leeren Intervallen, die durch drei aufeinanderfolgende Markierungsreize definiert waren. Die Modalität der Markierungsreize war entweder auditiv oder visuell. Abbildung 12 (auf der nächsten Seite) zeigt ein Modell der Zeitschätzung nach Hocherman und Ben-Dov (1979).

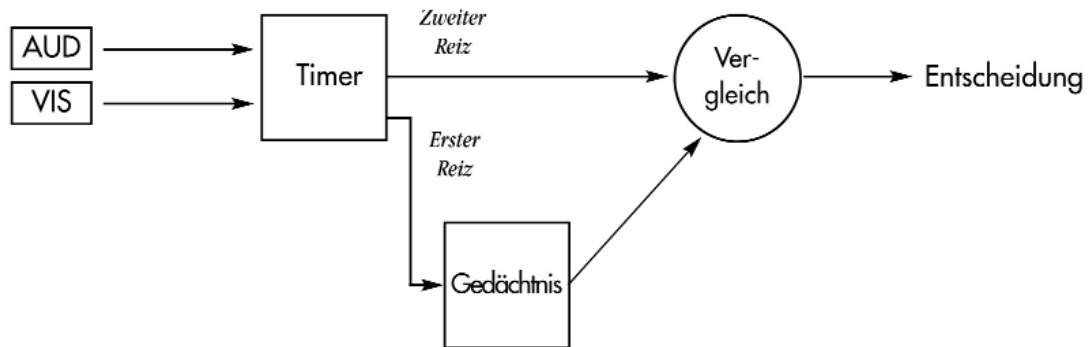


Abbildung 12. Ein Modell für den Vergleich zweier leerer Intervalle (nach Hocherman & Ben-Dov, 1979). Der Timer erfaßt die dargebotenen (akustisch oder optisch markierten) Intervalle. Das zuerst dargebotene Intervall wird zwischengespeichert und gelangt erst mit dem zweiten Intervall in den Vergleichsprozess. Nach abgeschlossenem Vergleich folgt die Entscheidung.

Ein wesentliches Ergebnis ihrer Untersuchung war, daß Intervalle akkurat geschätzt wurden, wenn die Markierungsreize des *ersten* Intervalls dieselbe Modalität aufwiesen (z. B. AAA, AAV, VVA), unabhängig davon, ob es akustische oder optische Reize waren. Die Autoren schlossen daraus, daß (1) Enkodierung und Memorisierung des ersten Intervalls bei modalitätsgleichen Markierungsreizen nicht verzerrt werden und (2) die Enkodierung des zweiten Intervalls modalitätsunabhängig verläuft, so daß (3) der Vergleich zwischen dem enkodierten Wert des zweiten Intervalls mit dem gespeicherten Wert des ersten Intervalls ebenfalls von der Modalität des zweiten Intervalls unbeeinflusst ist.

Dagegen wurde das erste Intervall länger als das zweite geschätzt, wenn Beginn und Ende des ersten Intervalls durch Markierungsreize *unterschiedlicher* Modalität begrenzt wurden (z. B. AVV, VAA, AVA). Da nach (2) die Modalität der Markierungsreize bei der Enkodierung des zweiten Intervalls keine Rolle zu spielen scheint, sollte der Schätzfehler auf das Konto der Gedächtnisrepräsentation des ersten Intervalls gehen. Die Autoren lassen offen, ob der Wechsel der Modalität innerhalb des ersten Intervalls nur den Prozeß der Memorisierung betrifft oder ob von der Existenz unterschiedlicher Speicher ausgegangen werden muß. Zusammenfassend interpretieren Hocherman und Ben-Dov die Ergebnisse ihrer Studie als das Resultat modalitätsspezifischer Gedächtnisfunktionen.

The finding that memorization of duration is modality-dependent suggests that there is more than one way by which time can be memorized. It is plausible that, although duration is measured by a modality-independent process, it is memorized within the framework of each sensory modality as an essential parameter of the sensory pattern. (Hocherman & Ben-Dov, 1979, p.813)

Modalitätsübergreifende Repräsentationen

Während Hocherman and Ben-Dov die Ergebnisse ihrer Untersuchung mit der Annahme von für jede Modalität unterschiedlichen Gedächtnissystemen erklären, schlagen Penney, Allan, Meck und Gibbon (1998) sowie Penney, Gibbon und Meck (2000) ein Modell vor, in dem die Gedächtnisrepräsentationen von Zeitintervallen zwischen verschiedenen Modalitäten gemischt werden können. In einem Bisektionsexperiment (Penney et al., 2000, Experiment 1; vgl. Appendix 1) sollten Versuchspersonen zum Zweck eines späteren Vergleichs zwei unterschiedlich lange Anker- bzw. Standarddauern lernen. Die Ankerdauern wurden sowohl auditiv als auch visuell dargeboten. In der anschließenden Testphase wurden die mit den beiden Ankerdauern zu vergleichenden Zeitintervalle ebenfalls sowohl über akustische als auch über optische Reize dargeboten. Dabei wurden die visuell dargebotenen Intervalle als kürzer beurteilt als objektiv gleich lange akustische Intervalle. Die Tatsache, daß ein klassischer Modalitätseffekt trotz eines bimodalen Gedächtnisses für die beiden Ankerdauern auftrat, ließ Penney und Mitarbeiter folgern, daß die Gedächtnisrepräsentation für jede Ankerdauer eine *Mischung* aus den jeweiligen auditiv und visuell enkodierten Ankerdauern darstellte. Dies bedeutet, daß offenbar keine modalitätsspezifische Repräsentation von Zeitintervallen vorlag.

A subject's reference memory for the short and the long signals is a mixture of accumulations obtained for auditory and visual signals experienced in training rather than a separate memory for each modality. (Penney et al., 1998, p. 192)

Penney et al. (1998, 2000) erklären den aufgetretenen Modalitätseffekt als das Ergebnis der modalitätsspezifischen Geschwindigkeit der inneren Uhr, deren Impulswerte über

den Akkumulator in das Langzeitgedächtnis überführt werden und dort zu einer Mischung zwischen auditiv enkodierten und visuell enkodierten Zeitintervallen führen. Daß allerdings das Gedächtnis selbst keinen Anteil an dem Modalitätseffekt haben soll, stellt nach bisherigem Erkenntnisstand nur eine Vermutung dar. Mit der vorliegenden Studie soll deshalb der Einfluß der Modalität auf das Gedächtnis für Zeitintervalle näher untersucht werden.

Ableitung der Fragestellung: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Reizmodalität und dem Gedächtnis für Zeitintervalle?

Das Gedächtnis für Zeitintervalle in quantitativen Modellen

Das Gedächtnis für Zeitintervalle ist in quantitativen Modellen der Zeitverarbeitung grundlegend anders konzipiert als das Gedächtnis für Objekte, Bedeutungen oder Ereignisse im Kontext der „klassischen“ Gedächtnispsychologie. Während dort zahllose Untersuchungen z. B. zur Organisation und Vernetzung von Gedächtnisinhalten (z. B. Bartlett, 1932; Collins & Quillian, 1969; Conrad, 1972; Mandler & Johnson, 1977; Meyer & Schvaneveldt, 1971; Minsky, 1975; Ripps, Shoben & Smith, 1973; Schank & Abelson, 1977) sowie zum Zusammenhang zwischen Enkodierung und Abruf von Informationen (z. B. Godden & Baddeley, 1975; Thomson, Robertson & Vogt, 1982; Tulving & Osler, 1968) durchgeführt worden sind, findet sich nichts dergleichen im Hinblick auf das „Zeit“-Gedächtnis. Woran liegt das?

Einen entscheidenden Faktor stellt mit Sicherheit die Auffassung über die Natur der „Zeit“-Repräsentation dar. So bildet beispielsweise in der *scalar timing theory* eine Verteilung von Werten, die jeweils eine bestimmte Anzahl aufsummierter Impulse repräsentieren, den Inhalt des Langzeitgedächtnisses für Zeitintervalle. Diese Werte, in welcher Form auch immer sie vorzustellen sind, haben keine andere Eigenschaft als ihre numerische Größe. Verknüpfungen zwischen Zeitwerten innerhalb des Gedächtnisses sind so wenig notwendig wie sinnvoll zu interpretieren. Konzepte wie bedeutungshaltige Wissensrepräsentation, Verarbeitungstiefe etc. sind auf die Repräsentation von Zeitwerten nicht übertragbar. Die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Reizmodalität (als Beispiel für eine Eigenschaft von konkreter Stimulation) und der Repräsentation von Zeitintervallen muß daher, wenn sie nicht sich selbst ad absurdum führen will, den rein quantitativen Charakter subjektiver Zeit in Frage stellen und stattdessen eine allgemeine Bedingtheit

von Gedächtnisinhalten jeglicher Art sowohl durch das abzubildende Objekt wie auch durch die Qualität der vorgeschalteten sensorischen Verarbeitung postulieren.

Im folgenden soll dargelegt werden, daß Annahmen über die Gedächtnisrepräsentation von Zeit nicht ohne Rückgriff auf Annahmen und Fakten zur perzeptuellen Aufnahme temporaler Information getroffen werden können. Im Gegenteil, theoretische Modelle über das Gedächtnis für temporale Information sind direkt ableitbar aus Annahmen über die vorgeschalteten Stufen der Verarbeitung von subjektiver Zeit. Deutlich wird dies bei den Uhrmodellen, deren Kernannahme die Abbildung physikalischer Zeit in eine Sequenz von Impulsen ist; in dieser Modellvorstellung ist die rein quantitative Gedächtnisrepräsentation von Zeit bereits enthalten.

Der ausgeklammerte Zusammenhang zwischen der Dauer und ihrem Trägersignal

Die dieser Studie zugrundeliegende Fragestellung erwächst aus dem Spannungsverhältnis zweier, miteinander konkurrierender Auffassungen über die Natur subjektiver Zeit. Während in den rein quantitativen Modellen zur Zeitverarbeitung eine amodale Repräsentation von Zeit vorausgesetzt ist, liegen auf der anderen Seite Daten und theoretische Konzeptionen vor, die einen Zusammenhang zwischen der Dauer eines bestimmten Stimulus bzw. Ereignisses und dessen nichtzeitlichen Attributen, wie z. B. der Verarbeitungsmodalität, nahelegen. So schreibt z. B. Geißler (2000):

Die Potenz des Lösungsansatzes ist die einer repräsentationsbezogenen Erklärung: Zeitliche Attribute existieren danach nicht losgelöst vom Ereignisinhalt, sondern sind, in Form spezifischer episodischer Repräsentationen im Gedächtnis, Bestandteile innerer Modelle der Realität, denen das Nervensystem gewissermaßen den Stempel seiner zeitlichen Grundmuster aufdrückt. (S. 137)

Der in der Psychologie häufig verwendete Terminus der „Zeitwahrnehmung“ impliziert die Möglichkeit der Wahrnehmbarkeit von Zeit analog zur Möglichkeit der Wahrnehmbarkeit von Dingen und Ereignissen. Dieser Auffassung steht der prinzipiell abstrakte Cha-

rakter von Zeit (wie auch von Raum) gegenüber. Zeit ist immer Zeit *von etwas*, objektive wie subjektive Zeit stehen immer in Beziehung zu einem Trägersignal, von dem sie abstrahiert wurden. So bemerkt Rubinstein (1962):

Raum und Zeit können nicht losgelöst von den Gegenständen und Erscheinungen wahrgenommen werden. Die Wahrnehmung eines Gegenstandes der äußeren Welt und die seiner räumlichen Eigenschaften lassen sich nicht voneinander trennen, ebenso wie die Wahrnehmung der Zeit nicht von den in der Zeit sich verändernden Erscheinungen losgelöst werden kann. (S. 70)

Wenn das so ist, dann ist es zumindest fraglich, ob Zeit losgelöst von dem Stimulus, dessen zeitliches Ausmaß beurteilt werden soll, auf den verschiedenen Stufen eines Informationsverarbeitungsprozesses resp. im Gedächtnis repräsentiert werden kann. Dies ist hingegen die grundlegende Annahme für quantitative Modelle subjektiver Zeit (vgl. Gibbon, 1991; Gibbon, Church & Meck, 1984; Thomas & Weaver, 1975; Zakay & Block, 1998). Zeitwahrnehmung erfolgt mittels innerer Uhr, ohne Bezug zur Ereignisqualität. Durch die Trennung vom Ereignis wird Zeit zur rein ideellen Entität (da es in der Wirklichkeit keine Zeit ohne Ereignis gibt). Die Frage nach der Repräsentation von Zeit ist dann losgelöst von der Frage nach der Repräsentation des Ereignisses.

Historisch betrachtet machte die Entwicklung von Uhrmodellen in den frühen 60er Jahren des 20. Jahrhunderts (Creelman, 1962; Treisman, 1963) die Integration der Zeitwahrnehmung in das damals sich auf dem Vormarsch befindende Informationsverarbeitungsparadigma der kognitiven Psychologie notwendig. Problematisch war allerdings, daß Zeit sich schlecht als Information im Sinne der kognitiven Psychologie interpretieren ließ. Newell und Simon (1972) betrachteten Informationen als *Symbole*, als Stellvertreter für etwas. Anderson (1983) beschrieb drei Formen von Informationen: semantische Information (*abstract propositions*), konfigurale Information (*spatial images*) und Reihenfolgeinformationen (*temporal strings*). Ausdrücklich betonte er, daß Zeitintervallinformationen nicht direkt enkodiert würden (p. 49). Damit also Zeit für den Informationsverarbeitungsansatz brauchbar wurde, mußte ein Symbol resp. ein Kode für sie gefunden werden. In den dominieren-

den Theorien zur Zeitverarbeitung ist dieses Symbol ihr – hypothetisches – physiologisches Korrelat der aufsummierten Impulse. Über diesen Umweg gelang es, Zeit in einem System verschiedener Prozessoren und Komponenten verarbeiten zu lassen, so daß aus dem Input „objektive“ bzw. „physikalische Zeit“ das Output „Zeitschätzung“ resultieren konnte. Damit aber war notwendigerweise verbunden, daß das Ereignis aus der Zeit eliminiert werden mußte; denn wenn Zeit einer Anzahl von Impulsen entspricht, also auf psychologischer Ebene zu einer bloßen Quantität wird, dann ist in dieser Quantität kein Platz mehr für das (qualitative) Ereignis.

Qualitative Bedingtheiten, wie konkrete Stimuluseigenschaften oder die Verarbeitungsmodalität, konnten soweit in die quantitativen Modelle integriert werden, wie sie als wirksame Faktoren auf der Ebene der inneren Uhr angesiedelt wurden. So teilen die meisten quantitativen Zeit-Modelle die Annahme, daß bestimmte Stimulationen der Wahrnehmungssysteme die innere Uhr aktivieren, und diese darauf mit bestimmter Frequenz Impulse aussendet. Die Frequenz der inneren Uhr wird nun als abhängig von der Qualität resp. Modalität der äußeren Stimulation betrachtet, und diese angenommenen Frequenzunterschiede erklären wiederum auf der Verhaltensseite die empirischen Effekte wie z. B. den klassischen Modalitätseffekt (vgl. z. B. Wearden et al., 1998). Bis hierhin ist die konkrete Stimulation erfolgreich ausgeklammert, insofern sie äußerlich geblieben ist, als externe Quelle die Geschwindigkeit der inneren Uhr manipulierend. Doch woher „weiß“ die innere Uhr, ob sie durch ein Lichtsignal oder ein Tonsignal aktiviert worden ist? Oder anders ausgedrückt:

The credit-assignment problem – how does the system “know” what stimulus to use to reset the accumulator (i. e. how does it identify the time marker?) – is left open by SET (scalar expectancy theory⁵; d. Verf.). (Staddon & Higa, 1999, p. 216)

Folglich müßte die innere Uhr über Mechanismen verfügen, mit deren Hilfe dem Stimulus Informationen über dessen Qualität bzw. Modalität entnommen werden können, um entsprechend – z. B. mit Frequenzveränderung – darauf zu reagieren.

⁵ entspricht der *scalar timing theory* von Gibbon (1991) und Kollegen; d. Verf.

Ob und inwieweit subjektive Zeit von der Wahrnehmung des Ereignisses losgelöst ist, scheint eines derjenigen theoretischen Probleme zu sein, dessen Bedeutung immer stärker in den Vordergrund rückt. Dazu stellen Grant und Robinson (1993) fest:

A particular interesting property of event duration is that it is a feature or characteristic common to all stimuli. This raises the possibility that organisms may abstract, or dissociate, temporal attributes of stimuli from other features of the stimulus. That is, organisms may perceive, and possibly represent, the temporal attribute of a stimulus independently of other attributes of that stimulus. (p. 106)

Und Grondin (2001, p. 37) fragt in einem kürzlich erschienenen Artikel völlig zu recht:

Within this event-related perspective, a number of critical questions arise: Does each sensory modality have its own relation to time, that is, its own set of rules or principles governing the temporal impressions created? To what extent do sensory modes share common principles, not only regarding the organization of sensory events, but also regarding recognition and decision mechanisms?

Grondin stellt hier nicht nur die Möglichkeit spezifischer Uhren heraus, sondern berücksichtigt darüberhinaus explizit spätere Verarbeitungsebenen wie das Gedächtnis und Entscheidungsprozesse. Die Annahme spezifischer Verarbeitungssysteme und spezifischer Repräsentationsformen gehört in der Tat zum Kanon des Informationsverarbeitungsparadigmas der Psychologie (vgl. Anderson, 1983; Kosslyn, 1980). Einige Autoren machen modalitätsspezifische Systeme an den Reizklassen fest, z. B. verbale versus nonverbale Reize (Paivio, 1971), andere an den verschiedenen Sinneskanälen, z. B. visuelle und auditive Kanäle (Segal & Fusella, 1971), wieder andere an einzelnen Reizaspekten wie Farbe und Form (z. B. Livingstone, 1988).

Die Modalität als Instrument zur Untersuchung der Repräsentation von Zeitintervallen

Die Modalität stellt eine Besonderheit nichtzeitlicher Ereignisattribute dar. Einerseits ist sie insoweit Eigenschaft eines Ereignisses, als die wahrgenommene Qualität des Ereignisses

nisses nicht von der Modalität zu trennen ist. Ein Gegenstand wird in der Regel in derjenigen Modalität wahrgenommen, in der er am deutlichsten in Erscheinung tritt (Rubinstein, 1962, S. 75). So ist ein Ton beispielsweise etwas grundsätzlich anderes als ein Lichtsignal. Andererseits ist sie insoweit *keine* Eigenschaft eines Ereignisses, als ein Ereignis prinzipiell über mehrere Modalitäten wahrgenommen werden kann. Tieffrequente Töne können sowohl in der auditiven als auch in der taktilen Modalität wahrgenommen werden. Die Größe eines Gegenstands kann sowohl visuell als auch auditiv oder taktil erfahren werden. Die Modalität sagt damit über zwei Dinge etwas aus: Erstens über den Inhalt des Ereignisses, dessen Dauer beurteilt werden soll (z. B. Licht versus Ton), und zweitens über die Art und Weise (lat. *modus*), mit der dieses Ereignis wahrgenommen wird (z. B. Auge versus Ohr).

Die Untersuchung einer möglichen Bedingtheit der Gedächtnisrepräsentation von Zeit durch ihr Trägersignal läßt sich operationalisieren als Untersuchung des Einflusses der Enkodierungsmodalität auf die Erinnerung von Zeitintervallen. Dies soll nachfolgend begründet werden.

(1) Die Untersuchung der Gedächtnisrepräsentation eines abzubildenden Objektes setzt gewisse Annahmen über bestimmte Repräsentationsformate, Repräsentationssysteme etc. voraus (vgl. Herrmann, 1988; Zimmer, 1993). Format- oder Systemannahmen rekurrieren nicht nur auf die Art und Weise, wie ein bestimmter Gedächtnisinhalt abgelegt ist, sondern auch darauf, wie dieser Gedächtnisinhalt zustande gekommen ist. Hier wird deutlich, daß jede Gedächtnisrepräsentation durch vorgeschaltete En- und Dekodierprozesse bedingt sein muß. Diese Verbindung zwischen der Gedächtnisrepräsentation und Enkodierungsprozessen führt geradewegs zur sensorischen Verarbeitungsstufe, welche die Grundlage jeder weiteren Verarbeitung darstellt. Und damit sind wir bei der sensorischen Modalität angekommen; denn jede Informationsaufnahme, also auch die der Reizdauer, erfolgt in einer bestimmten Modalität, innerhalb eines sensorischen Systems. Somit ist jedes frühe Abbild eines äußerlichen Objektes modalitätsspezifisch, die Modalität bildet – metaphorisch gesprochen – eine feste Klammer um den abzubildenden Inhalt. Zwischen sensorischen Stimulationen unterschiedlicher Modalität besteht damit der größtmögliche Unterschied. Be-

steht also eine Verbindung zwischen der Gedächtnisrepräsentation der Dauer und ihrem Trägersignal, dann sollte sie am ehesten als Zusammenhang zwischen Dauer und Modalität nachzuweisen sein.

(2) Ein Blick auf Tabelle 1 läßt bereits vermuten, daß der Einfluß der Modalität auf die Zeitschätzung eines der am häufigsten untersuchten Phänomene in der Auseinandersetzung mit dem Zusammenhang zwischen Reizeigenschaften und subjektiver Zeit darstellt. In der Tat konnte der Modalitätseffekt in der Zeitschätzung im Vergleich zu Effekten anderer sensorischer bzw. Signalgrößen am deutlichsten nachgewiesen und repliziert werden. Auch aus diesem Grund wurde für diese Studie die Modalität als Reizattribut gewählt; denn ein Faktor, dessen Auswirkungen auf den Wahrnehmungsprozeß von Zeit empirisch weitgehend belegt sind, könnte durchaus auch auf Gedächtnisebene eine Rolle spielen. Die Argumentationskette läßt sich auch umdrehen: Da bis auf die Modalität kaum ein anderes Reizattribut einen gesicherten Einfluß auf die Zeitschätzung ausübt, sollte für die Untersuchung des besagten Zusammenhangs von der Verwendung anderer Attribute als der Modalität vorerst abgesehen werden.

Die *scalar timing theory* als theoretischer Rahmen der Untersuchung

Die Frage nach einem Zusammenhang zwischen der Gedächtnisrepräsentation von Zeit und der konkreten Stimulation scheint insofern zentral für die theoretische Modellierung der Zeitverarbeitung zu sein, als ihre Beantwortung Auskunft darüber geben könnte, in welchem Rahmen es gerechtfertigt ist, subjektive Zeit als reine Quantität darzustellen. Daß eine quantitative Modellierung sinnvoll und notwendig ist, haben indes zahllose empirische Daten belegt, die im Sinne von Uhrmodellen und Informationsverarbeitungsansätzen, allen voran nach der *scalar timing theory*, erklärt werden konnten. Es scheint daher aufgrund des relativ hohen empirischen Gehalts dieser Theoriengruppe sinnvoll, einen möglichen Zusammenhang zwischen Stimulus und subjektiver Zeit auf dem Hintergrund quantitativer Modelle zu untersuchen. Zwei weitere Gründe mögen dies unterstreichen: Erstens

lassen sich nur von Modellen, die zu einem gewissen Grad quantifizierbar sind, exakte Vorhersagen und Hypothesen ableiten. Die Aufstellung exakter Hypothesen ist aber eine Grundvoraussetzung empirischer Wissenschaft. Zweitens läßt sich, da die Frage der Repräsentation von Zeit aus dieser Perspektive bislang wenig erforscht ist, als mögliches Resultat der Gültigkeitsbereich quantitativer Modelle eingrenzen und spezifizieren. Die Spezifikation von theoretischen Modellen ermöglicht in der empirischen Wissenschaft einen Erkenntnisfortschritt.

Für die Verwendung der *scalar timing theory* als Exemplar quantitativer Zeittheorien sprechen vor allem folgende Aspekte:

- ¶ Sie ist die einzige Theorie, die neben Annahmen zur inneren Uhr relativ detaillierte Aussagen zur Gedächtnisrepräsentation von Zeitintervallen macht.
- ¶ Darüberhinaus kann in ihr das Zeitschätzverhalten anhand von Entscheidungsregeln modelliert werden.
- ¶ Schließlich ist durch sie eine Interpretation des klassischen Modalitätseffekts möglich.

Aus dem Vorangegangenen leitet sich ab, daß, ausgehend von den Postulaten der *scalar timing theory*, die Frage untersucht werden soll, ob und inwieweit kurze Zeitintervalle amodal im Gedächtnis repräsentiert sind oder ob hingegen ein Einfluß der physikalischen Qualität bzw. sensorischen Modalität der Stimulation auf die Repräsentation von Zeitintervallen besteht. Zur empirischen Prüfung dieser Fragestellung wurden in der vorliegenden Studie sechs Experimente durchgeführt.

Verwendete Methode und ihre Begründung

Subjektive Zeit ist sensitiv gegenüber den Bedingungen, unter denen sie gemessen wird (Zakay, 1990, p. 59). Grundsätzlich stehen der Untersuchung subjektiver Zeit in der Experimentellen Psychologie mindestens vier Methoden zur Verfügung (Bindra & Waksberg, 1956; Clausen, 1950; Woodrow, 1951; vgl. auch Appendix 1 zur Übersicht der Zeitschätzungsmethoden). In *verbalen Schätzmethoden* sollen Versuchspersonen die Dauer eines dargebotenen Stimulus schätzen, indem sie die Größe des Intervalls bspw. in Sekunden oder Minuten beziffern. Eine Variante der verbalen Schätzung ist die *Größenschätzung*, bei der die Versuchspersonen ihre Antwort nicht in Zeiteinheiten, sondern in beliebigen Größen (z. B. Zahlen) angeben. Umgekehrt zur verbalen Schätzung sollen Versuchspersonen in einer *Produktionsaufgabe* zu einer beliebigen Zeiteinheit (z. B. „eine Sekunde“) ein entsprechendes Zeitintervall erzeugen (z. B. einen einsekündigen Ton). In einer *Reproduktionsaufgabe* wird Versuchspersonen ein Zeitintervall dargeboten, das sie reproduzieren sollen. Schließlich sollen in einer *Vergleichsaufgabe* mindestens zwei aufeinanderfolgende Intervalle hinsichtlich ihrer relativen Dauer (z. B. „gleich/ungleich“ oder „größer/kleiner“) verglichen werden.

Allan (1979) unterteilt die Zeitschätzungsmethoden in zwei Kategorien: Methoden der *Dauerskalierung*, in denen Versuchspersonen Dauern von gut zu unterscheidenden Intervallen beurteilen sollen, und Methoden der *Dauerdiskrimination*, in denen schwer zu unterscheidende Intervalle voneinander abgegrenzt werden sollen.

Trotz einer Vielzahl von Studien zur Genauigkeit und Konsistenz der einzelnen Methoden und zur Beziehung einzelner Methoden zueinander sind die Ergebnisse widersprüchlich (vgl. Carlson & Feinberg, 1968a, 1968b, 1970; Danziger & Du Preez, 1963; Doehring, 1961; Du Preez, 1963; Fraisse, Bonnet, Gelly & Michaut, 1962; Goldfarb & Goldstone, 1963; Hawkes, Bailey & Warm, 1961; Hornstein & Rotter, 1969; Treisman, 1963). Verbale Schätzungen sind nach Clausen (1950) ungenauer als andere Schätzmethoden. Block (1989b) konnte zeigen, daß die Ergebnisse aus Produktionsaufgaben und verbalen Schät-

zungen zwischen Versuchspersonen stärker streuten als die Ergebnisse von Reproduktions- und Vergleichsaufgaben, möglicherweise deshalb, weil erstere eine „Übersetzung“ der Dauer in konventionelle Zeiteinheiten (Uhrzeit) benötigten (a. a. O.). Nach Allan (1979) läßt sich insgesamt keine Überlegenheit einer Methode gegenüber anderen Methoden nachweisen.

Kriterien für die empirische Erfassung des Gedächtnisses für Zeitintervalle

In der zugrundeliegenden Fragestellung geht es um die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der im Gedächtnis repräsentierten Dauer eines Stimulus und dessen Modalität. Damit können die Reizmodalität als *unabhängige* Variable und die Gedächtnisleistung als *abhängige* Variable bestimmt werden. Das Erfassen der Gedächtnisleistung im Zusammenhang mit der vorliegenden Fragestellung setzt eine Zeitschätzmethode voraus, die vier kritischen Aspekten genügen sollte (s. Kasten 1).

Kasten 1.

Kriterien für eine adäquate Erfassung des Gedächtnisses für Zeitintervalle.

Reliabilitätsaspekt. Die Schätzung sollte möglichst zuverlässig sein. Dies kann zum einen dadurch gewährleistet werden, daß auf Reproduktions- oder Vergleichsmethoden zurückgegriffen wird (vgl. Block, 1989), zum anderen sollte das Schätzergebnis einer Versuchsperson nicht durch einen einzigen Schätzvorgang, sondern durch eine Vielzahl von Schätzvorgängen bzw. Versuchsdurchgängen erbracht werden.

Theoretischer Aspekt. Die Ergebnisse der Schätzung sollten sich direkt auf die Hypothesen und die ihnen zugrundeliegenden Theorien beziehen lassen. “Testing the validity of any specific model of subjective time should be done only by using a measurement design that activates temporal processes which are assumed to be compatible with those inferred by the tested model” (Zakay, 1990, p. 79).

Pragmatischer Aspekt. Die Ergebnisse der Schätzung sollten mit den Ergebnissen aus relevanten anderen Untersuchungen weitgehend vergleichbar sein.

Gedächtnisaspekt. Da das Gedächtnis für Zeitintervalle erfaßt werden soll, sollte die verwendete Methode eine Lern- bzw. Trainingsphase und eine anschließende Testphase beinhalten.

Die Methode des *temporal generalization*

Unter Berücksichtigung dieser vier Aspekte wurde für die nachfolgend zu beschreibenden Experimente eine Methode verwendet, die unter dem Namen *temporal generalization* ausführlich zuerst von Church und Gibbon (1982) im Tierexperiment und später von Wearden (1992) im Humanexperiment beschrieben wurde und auf die Methode des *stimulus generalization*⁶ zurückgeht. Bezüglich der Einteilung der Zeitschätzmethoden nach Allan (1979) handelt es sich bei der Generalisationsmethode um eine Vergleichsmethode. In einer Generalisationsaufgabe sollen Versuchspersonen einen Zielreiz von Vergleichsreizen abgrenzen. Zielreiz und Vergleichsreize unterscheiden sich dabei meist nur auf einer Beschreibungsdimension, z. B. hinsichtlich der Lautstärke (Heinemann, Avin, Sullivan & Chase, 1969), der Farben (Blough, 1965, 1975; Thomas & King, 1959), der Tonhöhe (Cross, 1965; Jenkins & Harrison, 1960) oder der Dauer der Stimuli (z. B. Church & Gibbon, 1982; Wearden, 1992; Wearden & Towse, 1994). Abhängige Variable bei der Stimulusgeneralisation können die Stärke (Hovland, 1937) oder die Latenz (Flagg, Medin & Davis, 1974; Heinemann et al., 1969) einer Reaktion sein, in der Regel wird aber die Häufigkeit einer Reaktion erfaßt (z. B. Guttman & Kalish, 1956; Hanson, 1959). Die Aufgabe der Versuchsteilnehmer besteht darin zu entscheiden, ob der Zielreiz dargeboten wurde oder nicht („go/no-go“-Prozedur; vgl. Heinemann et al., 1969). Je ähnlicher der Vergleichsreiz dem Zielreiz ist, desto häufiger wird

⁶ Die Ursprünge der Generalisationsmethode gehen auf die Konditionierungstheorien von Hull (1943) und Spence (1937) zurück.

der Vergleichsreiz mit dem Testreiz verwechselt, d. h. die Stärke bzw. Häufigkeit einer Reaktion nimmt mit zunehmender Ähnlichkeit zwischen Ziel- und Vergleichsreiz zu.

In studies of stimulus generalization, a subject is trained to make some response A_1 in the presence of a stimulus S_1 , and is then tested with a variety of stimuli in order to determine whether the probability of response A_1 varies systematically with the similarity of other stimuli to S_1 . (Neimark & Estes, 1967, p. 431)

Die Häufigkeit der Reaktion in Abhängigkeit vom dargebotenen Reiz kann als *Generalisationsgradient* dargestellt werden (s. Abbildung 13). Generalisationsgradienten geben in der Regel Auskunft über die *relativen* Reaktionshäufigkeiten, d. h. die Anzahl der Reaktionen bei Darbietung eines Stimulus wurde zuvor geteilt durch die Anzahl der Stimulusdarbietungen.

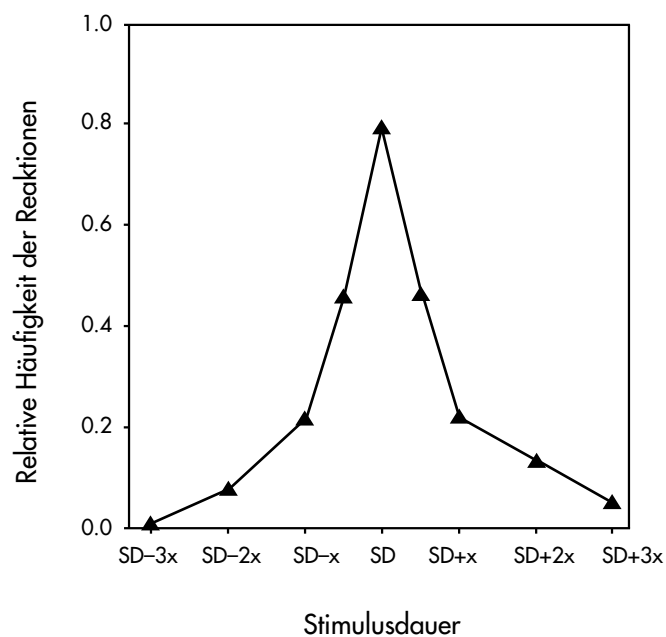


Abbildung 13. Beispiel für einen (fiktiven) Generalisationsgradienten als Ergebnis einer Dauerdiskriminationsaufgabe. Auf der Ordinate ist die relative Häufigkeit der Reaktionen als Funktion der Stimulusdauer (d. i. die Häufigkeit der Reaktionen relativiert an der Darbietungshäufigkeit der jeweiligen Stimulusdauer) abgetragen. Auf der Abszisse sind die verwendeten Stimulusdauern (Standarddauer und Vergleichsdauern) zu sehen.

Je größer die Diskriminationsleistung ist, desto steiler ist der Gradient. Damit ist ein wichtiger Zusammenhang zwischen dem Konzept der Generalisation und dem Konzept der Diskrimination erwähnt und die Richtung der Definition von Generalisation angedeutet.

Nach Brown (1965; vgl. auch Heinemann & Chase, 1975) meint Generalisation einerseits ein konkretes empirisches Phänomen, andererseits einen Prozeß, der das empirische Phänomen erklären soll. Die erste Definition beinhaltet, daß ein Subjekt dann generalisiert, wenn es in identischer oder ähnlicher Weise auf einen unkonditionierten Reiz (Vergleichsreiz) reagiert, wie es dies auf einen konditionierten Reiz (Zielreiz) tut. Die zweite Definition verweist auf verdeckte Prozesse und Mechanismen, die – je nach zugrundegelegter Theorie – die empirische Generalisation erklären sollen, wie z. B. die Annahme einer kortikalen Erregungsausbreitung. Im empirischen Sinne bilden Generalisation und Diskrimination zwei Seiten derselben Medaille: Generalisation ist das gerade Gegenteil von Diskrimination. “If the degree of discrimination is given by db' , then the degree of generalization is $1/db'$ ” (Heinemann & Chase, 1975, p. 307). Bisweilen ist die inverse Beziehung zwischen Generalisation und Diskrimination hingegen angezweifelt worden (Ganz, 1965; Guttman & Kalish, 1956).

Church und Gibbon (1982) haben mit einigen Generalisations-Experimenten, bei denen die Dauer der Stimuli die zu diskriminierende Variable war, einige interessante Befunde erbracht, die sowohl für die theoretische Modellierung von Zeitschätzungen als auch für die praktische Anwendbarkeit der Generalisationsmethode in der Erforschung der Verarbeitung temporaler Information von Bedeutung sind. Die Autoren ließen Ratten lernen, nach der Dauer von vier Sekunden einen Hebel zu betätigen (operante Konditionierung). Die Dauer bezog sich auf das Aussetzen der Beleuchtung der Experimentalbox, in der die Ratten sich befanden. Immer wenn eine Ratte nach viersekündiger Dunkelperiode den Hebel betätigte, wurde sie durch Futtergabe verstärkt. In einer Testphase wurden neben der Vier-Sekunden-Dauer weitere Vergleichsdauern (0.8 s, 1.6 s, 2.4 s, 3.2 s, 4.8 s, 5.6 s, 6.4 s und 7.2 s) verwendet. Während eine Reaktion nach einer Dunkelperiode von vier Sekunden (Standarddauer) weiterhin verstärkt wurde, blieb eine Verstärkung der Reaktion nach Dunkelperioden länger oder kürzer als die Standarddauer aus. Es zeigte sich, daß die Versuchstiere auch dann reagierten, wenn das Dunkelintervall größer oder kleiner der Standarddauer war, und daß die Häufigkeit der Reaktionen mit zunehmender Unterschiedlichkeit der Intervalle abnahm, wohingegen am häufigsten bei Exposition der Standarddauer reagiert wurde. Je län-

ger die zu lernende Standarddauer war, desto flacher wurde der Generalisationsgradient, d. h. desto größer wurden die Abweichungen von der zentralen Tendenz der Reaktionen (Experiment 3). Sowohl eine Verringerung der Verstärkungshäufigkeit als auch eine Verringerung der Expositionshäufigkeit der Standarddauer führten zu einer generellen Verringerung der Reaktionshäufigkeit und damit der Höhe des Gradienten, ohne daß jedoch Form und Maximum des Gradienten davon betroffen waren (Experiment 4 und 5).

Church und Gibbon (1982) integrierten das empirische Phänomen der Generalisation in die *scalar timing theory* (Gibbon, 1977). Nach dieser sind temporale Diskriminationen das Ergebnis einer Entscheidung auf Grundlage des Verhältnisses zwischen der subjektiven Dauer des Testreizes und der gespeicherten Dauer des Standardreizes. Liegt das Verhältnis unterhalb eines bestimmten Kriteriums, erfolgt eine Reaktion. Wearden (1991, 1992) übertrug das von Church und Gibbon (1982) entwickelte Generalisationsexperiment auf Untersuchungen mit Versuchspersonen. Diese erhielten mehrere Darbietungen einer Standarddauer von 400 ms und sollten anschließend entscheiden, ob nun dargebotene Vergleichsdauern (die zwischen 100 ms und 700 ms lagen) der Standarddauer entsprachen oder nicht. Wearden (1992) verwendete einen 500 Hertz Sinuston als Trägersignal. Er erhielt ähnliche Generalisationsgradienten wie Church und Gibbon (1982), allerdings mit dem entscheidenden Unterschied, daß Weardens Gradienten stärker asymmetrisch (linkssteil) waren als die von Church und Gibbon. Wearden (1992) erklärte diese Diskrepanz durch Modifizierung der von Church und Gibbon (1982) vorgeschlagenen Entscheidungsregel. Nach Wearden identifizieren Versuchspersonen dann eine Dauer als die Standarddauer, wenn

$$|(s^* - t)| / t$$

ein bestimmtes Kriterium unterschreitet (mit s^* als gespeicherte Standarddauer und t als wahrgenommener Dauer). Ist $t > s^*$, führen gleiche absolute Differenzen zwischen t und s^* zu kleineren Werten des Quotienten, als wenn $t < s^*$ ist. Somit wäre z. B. die Wahrscheinlichkeit größer, ein Intervall von 500 ms als Standarddauer zu identifizieren als ein Intervall von 300 ms, obwohl die absolute Differenz zwischen 500 ms und 400 ms bzw. zwischen 300 ms und 400 ms gleich ist.

Auch in Experimenten dieser Studie sollten Versuchspersonen entscheiden, ob ein zuvor gelerntes kurzes Zeitintervall (Standarddauer) im Kontext von Vergleichsreizen dargeboten wurde. Die Vergleichsreize entsprachen hinsichtlich ihres zeitlichen Ausmaßes entweder dem Standard oder waren von diesem verschieden (kürzer oder länger). Um in dieser *temporal generalization*-Aufgabe die Diskriminationsleistung annähernd von der Rekognitionsleistung trennen zu können, wurde die Gesamtaufgabe in eine Trainings- und eine Testphase unterteilt⁷. In der Trainingsphase sollten Versuchspersonen die Standarddauer lernen, deren Erinnerung in einer anschließenden Testphase geprüft wurde. Während der Testphase war eine Mitwirkung des Gedächtnisses unumgänglich, da für den Vergleich zwischen memorierter Standarddauer und dargebotener Vergleichsdauer die Aktivierung der Gedächtnisrepräsentation der Standarddauer erforderlich war.

Variation der unabhängigen Variablen und abhängiges Maß

Unabhängige Variablen waren die Modalität der in der Trainings- und Testphase dargebotenen Reize (auditiv versus visuell) sowie die Dauer der dargebotenen Stimuli. Die Modalität wurde interindividuell, die Dauer intraindividuell variiert. Somit wurde ein dreifaktorielles Design realisiert, in dem die Leistung in der Testphase auf die Wirkung der Modalität von sowohl Trainings- als auch Testphase bezogen werden konnte.

Abhängiges Maß war die Anzahl positiver Antworten („Gleich“-Antworten) bezogen auf jede einzelne Stimulusdauer.

Tabelle 2 (auf der nächsten Seite) veranschaulicht das Untersuchungsdesign.

⁷ Grundsätzlich ist eine Konfundierung zwischen der wahrnehmungsbasierten Diskrimination und der gedächtnisbasierten Rekognition nie ganz auszuschließen, da das „Wiedererkennen“ der Standarddauer mit ihrer Diskriminierbarkeit zusammenhängt. Je schlechter das Intervall zu diskriminieren ist, desto schlechter wird auch dessen Rekognition sein. Dennoch ist eine Kontrolle des Einflusses der Diskriminierbarkeit des Testreizes ansatzweise möglich, wenn dieser zwischen den Bedingungen konstant gehalten wird.

Tabelle 2. Allgemeines Untersuchungsdesign.

		UV 2: Modalität der Testphase		
		AUD	VIS	
UV 1: Modalität der Trainingsphase	AUD	$SD - 3x$	$h_{\text{pos_SD} - 3x}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD} - 3x}$ AUD/VIS
		$SD - 2x$	$h_{\text{pos_SD} - 2x}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD} - 2x}$ AUD/VIS
		$SD - x$	$h_{\text{pos_SD} - x}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD} - x}$ AUD/VIS
		SD	$h_{\text{pos_SD}}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD}}$ AUD/VIS
		$SD + x$	$h_{\text{pos_SD} + x}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD} + x}$ AUD/VIS
		$SD + 2x$	$h_{\text{pos_SD} + 2x}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD} + 2x}$ AUD/VIS
		$SD + 3x$	$h_{\text{pos_SD} + 3x}$ AUD/AUD	$h_{\text{pos_SD} + 3x}$ AUD/VIS
	VIS	$SD - 3x$	$h_{\text{pos_SD} - 3x}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD} - 3x}$ VIS/VIS
		$SD - 2x$	$h_{\text{pos_SD} - 2x}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD} - 2x}$ VIS/VIS
		$SD - x$	$h_{\text{pos_SD} - x}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD} - x}$ VIS/VIS
		SD	$h_{\text{pos_SD}}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD}}$ VIS/VIS
		$SD + x$	$h_{\text{pos_SD} + x}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD} + x}$ VIS/VIS
		$SD + 2x$	$h_{\text{pos_SD} + 2x}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD} + 2x}$ VIS/VIS
		$SD + 3x$	$h_{\text{pos_SD} + 3x}$ VIS/AUD	$h_{\text{pos_SD} + 3x}$ VIS/VIS

Anmerkung. UV1 bzw. UV2 bezeichnen die jeweiligen unabhängigen Variablen. Durch vollständige Kreuzung der beiden unabhängigen Variablen entstehen vier interindividuelle Versuchsbedingungen: zwei unimodale (AUD/AUD und VIS/VIS) sowie zwei crossmodale (AUD/VIS und VIS/AUD) Bedingungen. Innerhalb jeder Versuchsbedingung wird die Darbietungsdauer des Reizes variiert. In diesem allgemeinen Versuchsplan sind es sieben Variationen (die Standarddauer, SD , und sechs Vergleichsdauern). Daraus ergeben sich insgesamt $2 \times 2 \times 7 = 28$ Bedingungskombinationen.

Für die Berechnung der Diskriminationsleistung wurde das abhängige Maß rechnerisch modifiziert (s. Kasten 2), da (1) die Darbietungshäufigkeit der Standarddauer nicht mit der Darbietungshäufigkeit der Vergleichsdauern identisch war und (2) durch die Modifikation eine Vergleichbarkeit der Leistung der Probanden zwischen unterschiedlichen Studien mit ähnlicher experimenteller Aufgabe ermöglicht wird.

Kasten 2.**Modifikation der abhängigen Variablen.**

Die Anzahl positiver Antworten je dargebotenem Stimulus wurde an der Anzahl der Stimulusdarbietungen relativiert:

$$h_{\text{POS}}(a) = \Sigma_{\text{POS}}(a) / n(a),$$

mit $\Sigma_{\text{POS}}(a)$ = Summe der positiven Antworten bezogen auf Stimulus a und $n(a)$ = Anzahl der Darbietungen von Stimulus a .

Dieses so modifizierte Maß bildet die Grundlage des Generalisationsgradienten und der inferenzstatistischen Auswertungen.

Aus $\Sigma_{\text{POS}}(a)$ kann die *prozentuale Häufigkeit korrekter Entscheidungen* bestimmt werden. Die Entscheidungsmöglichkeiten in einer Generalisationsaufgabe setzen sich aus vier unterschiedlichen Entscheidungstypen zusammen (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3. Vier Entscheidungstypen bei einer Generalisationsaufgabe.

Entscheidung des Probanden	Dargebotener Stimulus	
	Standarddauer (SD)	Nichtstandard-Vergleichsdauer (VD)
„Gleich“	Treffer (T)	Falscher Alarm (FA)
„Verschieden“	Verpasser (V)	Richtige Zurückweisung (RZ)

Korrekte Entscheidungen gehen aus der Summe von *Treffern* und *richtigen Zurückweisungen* hervor: $KORR = T + RZ$. Treffer wiederum sind identisch mit positiven Antworten bei Darbietung der Standarddauer. Zur Berechnung der prozentualen Häufigkeit korrekter Entscheidungen wird die Summe der Treffer T und der richtigen Zurückweisungen RZ an der Gesamthäufigkeit der abgegebenen Antworten (rsp. Stimulusdarbietungen) n relativiert:

$$h_{\text{KORR}} = 1/n \cdot (T + RZ)$$

Prospektives Design

Während Versuchspersonen in einem *retrospektiven* Design nicht wissen, daß sie in einer späteren Testphase die Dauer dargebotenen Reizmaterials beurteilen sollen, wird in einem *prospektiven* Design explizit auf die Dauer der Stimuli und deren späterer Schätzung hingewiesen. Damit soll erreicht werden, daß die Versuchspersonen ihre Aufmerksamkeit auf die zeitliche Dimension der Stimuli richten. Der Vorteil prospektiver gegenüber retrospektiver Zeitschätzungen liegt in der Fokussierung auf die Verarbeitung zeitlicher Information (vgl. Zakay, 1990). So fanden z. B. Brown und Stubbs (1988), daß, verglichen mit retrospektiven Schätzungen, prospektive Zeitschätzungen genauer sind; retrospektive Schätzungen dagegen sind leichter durch die nichtzeitlichen Eigenschaften des Reizmaterials und des Kontextes beeinflussbar (vgl. Block, 1992). Möglicherweise gehen prospektive und retrospektive Schätzungen auf unterschiedliche Verarbeitungsmechanismen zeitlicher Information zurück (Block, 1992; Block, George & Reed, 1980; Hicks, Miller & Kinsbourne, 1976).

Drei Gründe sprechen für die Wahl eines prospektiven Designs im Hinblick auf die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Reizmodalität und der Erinnerung an ein Zeitintervall: Erstens sollten potentielle Einflüsse auf die abhängige Variable, die auf Faktoren zurückgehen, die – bis auf die Modalität – nichtzeitlicher Art sind (z. B. der „Inhalt“ eines Stimulus), möglichst ausgeschlossen werden; zweitens sollte sich, da prospektive Untersuchungen in der Regel genauere Schätzungen ergeben, ein möglicher Effekt der Modalität leichter nachweisen lassen als in einer retrospektiven Untersuchung; schließlich fußt die dieser Untersuchung zugrundegelegte *scalar timing theory* überwiegend auf Daten aus prospektiven Untersuchungen.

Das Untersuchungsdesign im Licht der vier kritischen Aspekte

Mit diesem Untersuchungsdesign und der verwendeten Methode kann den oben genannten Kriterien weitgehend entsprochen werden. Durch Verwendung einer Vergleichsaufgabe inklusive der Möglichkeit, in der Testphase eine Vielzahl von Versuchsdurchgängen durchführen zu können, sollte die Aufgabe in sich hinreichend reliabel sein (*Reliabilitätsaspekt*). Ferner ist es möglich, Erklärungen und Vorhersagen von Verhalten auf essentielle Komponenten quantitativer Theorien, z. B. die Entscheidungsregel (z. B. Church & Gibbon, 1982; Heinemann & Chase, 1975; Wearden, 1992), zu stützen (*theoretischer Aspekt*). Darüber hinaus ist eine relative Vergleichbarkeit mit Daten aus Untersuchungen gegeben, die gewisse Parallelen zur Fragestellung und zur theoretischen Einordnung aufweisen (z. B. Wearden, 1999; Wearden et al., 1998; Wearden et al., 1999; *pragmatischer Aspekt*). Schließlich ist die Aufgabe gedächtnisbezogen und insoweit als Methode zur Untersuchung des Einflusses des Gedächtnis auf die Diskrimination von Zeitintervallen anzuwenden (*Gedächtnisaspekt*).

EMPIRISCHER TEIL

Allgemeine Methode

Versuchspersonen

Alle Versuchspersonen nahmen freiwillig an der Untersuchung teil und wurden für ihre Teilnahme finanziell entschädigt. Keine von ihnen war vor der Untersuchung mit deren Ablauf und Zielen vertraut, und insofern können alle Versuchspersonen als naiv bezüglich der Fragestellung betrachtet werden. Alle Versuchspersonen wurden zufällig den einzelnen Versuchsbedingungen zugeordnet.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Die Stimuli waren entweder akustisch oder optisch. Ähnlich wie in anderen Zeitschätzungsexperimenten (z. B. Meredith & Wilsoncroft, 1989; Wearden et al. 1998; Wearden et al., 1999; Wearden & Bray, 2001) waren die akustischen Stimuli Sinustöne (500 Hz, -3.01 dB), die via Kopfhörer über beide Ohren dargeboten wurden. Die optischen Stimuli waren graue Rechtecke (6 x 12 cm) auf schwarzem Grund und wurden auf dem Computermonitor präsentiert. Die Versuchspersonen wurden einzeln untersucht und saßen in einem moderat beleuchteten Raum weitgehend isoliert von äußeren Schall- und Lichteinflüssen. Die Versuchssteuerung erfolgte über einen IBM-kompatiblen Pentium-II-Computer mit einem 9-Zoll-Farbmonitor (50 Hz). Die Antworten der Versuchspersonen wurden über die Tastatur registriert. Das Versuchssteuerungsprogramm wurde für alle Experimente mit der skriptbasierten Programmiersprache *Experimental Run Time Systems (ERTS)*, Version 3.28, von Beri-Soft Cooperation, Frankfurt, auf DOS-Ebene geschrieben. ERTS ermöglicht eine Genauigkeit der zeitlichen Abfolge von Stimuli und Reaktionen im Millisekundenbereich.

Instruktion und Versuchsablauf

Jede Versuchsperson nahm einzeln an der Untersuchung teil. Sämtliche Instruktionen wurden über den Computer dargeboten. Zu Beginn der Trainingsphase wurden die Versuchspersonen instruiert, sich ein bestimmtes Zeitintervall zu merken, das mit „Standarddauer“ bezeichnet wurde (s. Kasten 3).

Kasten 3.**Beispiel für eine auditive Trainingsphase. Instruktion, Teil 1.**

[Monitordarbietung Nr. 1]

Lernen eines Zeitintervalls

In diesem Versuch sollen Sie ein Zeitintervall lernen.
Zu diesem Zweck hören Sie gleich via Kopfhörer einen Ton, der
für eine bestimmte Dauer fünf mal dargeboten wird.
Die Dauer der Darbietung ist immer gleich.
Bitte versuchen Sie, sich diese Dauer zu merken.

Setzen Sie bitte den Kopfhörer auf.
Durch Drücken einer beliebigen Taste starten Sie das Experiment.

Während der Trainingsphase wurde die Standarddauer entweder in der auditiven oder in der visuellen Modalität dargeboten. Nachdem die Versuchspersonen die Instruktion gelesen hatten, wurde ihnen fünfmal nacheinander die Standarddauer dargeboten. Zwischen jeder Darbietung der Standarddauer lag ein Interstimulusintervall von drei Sekunden. Nach der fünfmaligen Darbietung der Standarddauer folgte die *temporal generalization*-Aufgabe. Die Versuchspersonen erhielten die Aufforderung, durch Drücken einer beliebigen Taste die Generalisationsaufgabe zu starten (s. Kasten 4 auf der nächsten Seite).

Kasten 4.**Beispiel für eine auditive Trainingsphase. Instruktion, Teil 2.**

[Monitordarbietung Nr. 2]

Das Zeitintervall, das Sie gelernt haben, soll im folgenden "Standard-Dauer" genannt werden.

Um das Lernen zu vertiefen, wird die Standard-Dauer jetzt mit einer Vergleichsdauer gepaart. Der Ablauf ist folgender: Sie werden wieder einen Ton hören, der so lange dauert wie die Standard-Dauer. Anschließend folgt ein zweiter Ton, dessen Dauer entweder der Standard-Dauer gleicht oder von ihr verschieden ist.

Ihre Aufgabe besteht darin zu entscheiden, ob die Dauer des zweiten Signals mit der Standard-Dauer identisch ist. Wenn Sie der Meinung sind, daß es die gleiche Dauer ist, drücken Sie bitte die Y-Taste.

Wenn Sie hingegen der Meinung sind, daß es eine andere Dauer ist, drücken Sie bitte die Punkt-Taste.

Dieser Vorgang:

Darbietung der Standard-Dauer -> Darbietung einer Vergleichsdauer -> Ihre Entscheidung
wird einige Male wiederholt werden.

Wichtig ist, daß Sie sich die Standard-Dauer gut merken.

(Durch Drücken einer beliebigen Taste geht es weiter.)

Nachdem eine Taste gedrückt worden war, folgte mit einer Latenz von 500 ms entweder ein auditiver oder ein visueller Stimulus mit der Standarddauer. Fünf Sekunden nach Darbietung der Standarddauer folgte ein qualitativ identischer Stimulus mit entweder gleicher oder unterschiedlicher Dauer. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin zu entscheiden, ob die Dauer des zweiten Stimulus der Dauer des ersten Stimulus glich. Nachdem der Vergleichsreiz dargeboten wurde, drückten die Versuchspersonen entweder die Y-Taste (für „gleich“) oder die Punkt-Taste (für „verschieden“). Nach korrekten Antworten erhielten die Versuchspersonen eine positive Rückmeldung („Ihre Antwort war richtig!“), nach falschen Antworten eine negative Rückmeldung („Ihre Antwort war leider falsch!“). Die Aufgabe bestand aus 20 Versuchsdurchgängen in den Experimenten 3, 4 und 5, aus 40 Durch-

gängen in den Experimenten 2 und 6 und aus 50 Durchgängen in Experiment 1. Die Versuchsdurchgänge wurden zu Blöcken zusammengefaßt, innerhalb derer die Reihenfolge ihrer Darbietung randomisiert war (ein Block in Experiment 2, zwei Blöcke in den Experimenten 1, 3, und 4, zwei mal zwei Blöcke in Experiment 6 und fünf Blöcke in Experiment 5). Nachdem der erste Block erfolgt war, folgte der zweite usw. Innerhalb eines Blocks lag die nominelle Wahrscheinlichkeit für die Darbietung der Standarddauer bei $p = .40$, während die Wahrscheinlichkeit für die Darbietung jeder einzelnen Vergleichsdauer, die ungleich der Standarddauer war, $p = .10$ war. Das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Versuchsdurchgängen (*Inter-Trial-Intervall*) variierte zwischen zwei und zehn Sekunden, je nachdem, wie schnell jede Versuchsperson sich entschieden hatte. Die Trainingsphase endete mit einer dreifachen Darbietung der Standarddauer.

Nach der Trainingsphase begann die Testphase. Die Versuchspersonen lasen die Instruktion für die nun folgende Aufgabe (s. Kasten 5).

Kasten 5.**Beispiel für eine visuelle Testphase. Instruktion, Teil 3.**

[Monitordarbietung Nr. 3]

Jetzt soll geprüft werden, wie gut Sie die Standard-Dauer gelernt haben. Zu diesem Zweck werden Ihnen nun RECHTECKE visuell dargeboten.

Ihre Aufgabe besteht darin zu entscheiden, ob die Dauer der Rechtecke der Standard-Dauer entspricht.

Im Unterschied zur Lernphase entscheiden Sie bitte nach JEDEM Signal, ob dessen Dauer der gelernten Standard-Dauer gleicht oder nicht.

Ein Feedback erfolgt nun nicht mehr.

(Durch Drücken einer beliebigen Taste geht es weiter).

Anschließend wurden den Versuchspersonen wiederholt Zeitintervalle dargeboten, die entweder gleich der Standarddauer oder von dieser verschieden waren. Nun sollten die Versuchspersonen sich nach *jeder* Stimulusdarbietung entscheiden, ob die Dauer des dargebotenen Stimulus der Standarddauer entsprach oder nicht. Eine Rückmeldung über die Richtigkeit ihrer Entscheidung wurde nicht mehr erteilt, um zu verhindern, daß über die Rückmeldung die mentale Repräsentation der Standarddauer oder das Entscheidungskriterium der Versuchspersonen verändert würde. Die in den Experimenten verwendete Aufgabe unterschied sich damit insofern von einer herkömmlichen Generalisationsaufgabe, als der Standardreiz (die Standarddauer) in den Versuchsdurchgängen *nicht dargeboten* wurde, sondern *erinnert* werden mußte. Abbildung 14 stellt den zeitlichen Verlauf der Testphase dar⁷.

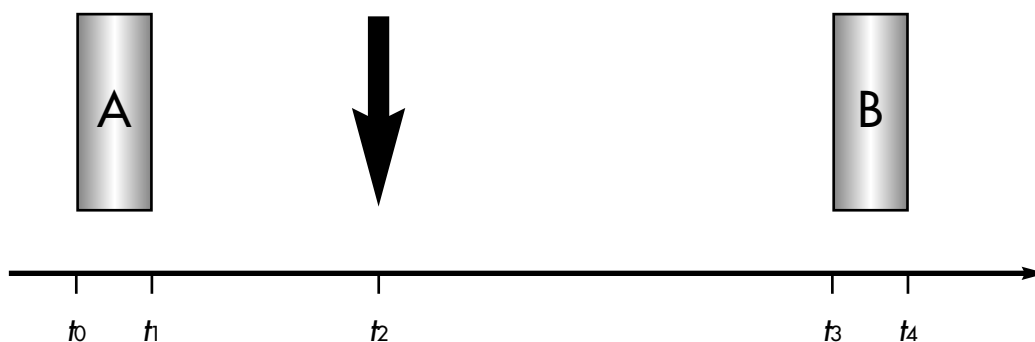


Abbildung 14. Zeitlicher Ablauf der Testphase. Der waagerechte, nach rechts gerichtete Pfeil repräsentiert die Zeitachse, die grauen Flächen symbolisieren die dargebotenen Signale.

$t_1 - t_0$ = Dauer des Signals A; $t_4 - t_3$ = Dauer des Signals B; t_2 = Zeitpunkt der Entscheidung; $t_2 - t_0$ = Entscheidungszeitintervall; $t_3 - t_2$ = Intertrialintervall = 3000 ms.

Jede Versuchsperson erhielt in der Testphase 200 Stimulusdarbietungen, unterteilt in 20 Blöcke. Innerhalb eines Blocks erfolgte die Auswahl der Stimuli wieder randomisiert. Die nominellen Wahrscheinlichkeiten für die Standarddauer und die von dieser abweichenden Vergleichsdauern war die gleiche wie in der Trainingsphase.

Im Anschluß an die Testphase wurde vom Versuchsleiter das Alter der Versuchsperson, deren Geschlecht und die Dauer der experimentellen Untersuchung festgehalten.

⁷ Die über alle Experimente gemittelte individuelle Entscheidungszeit betrug (gerundet) 2207 ms (vgl. Appendix 2). Zuzüglich des konstanten Intertrialintervalls von 3000 ms ergibt sich damit ein durchschnittliches Interstimulusintervall von 5207 ms. Die Dauer der kurzzeitigen Speicherung liegt hingegen zwischen 1.5 und zwei Sekunden (vgl. Baddeley, 1990; McGavren, 1965).

Die Parameter für die einzelnen Experimente sind in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Tabelle 4. Parameter für die Experimente.

	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3	Experiment 4	Experiment 5	Experiment 6
<i>Bedingungen</i>	AUD/AUD; VIS/VIS; AUD/VIS; VIS/AUD	AUD/VIS; VIS/AUD	Sinus/Sinus; Rauschen/ Rauschen; Sinus/ Rauschen; Rauschen/ Sinus	AUD/AUD; VIS/VIS; AUD/VIS; VIS/AUD	AUD/AUD; VIS/VIS; AUD/VIS; VIS/AUD	AUD + VIS/AUD; AUD + VIS/VIS
<i>Stimuli</i>	Sinuston, Rechteck	Sinuston, Rechteck	Sinuston, Rauschen	Sinuston, Rechteck	Sinuston, Rechteck	Sinuston, Rechteck
<i>Standard (ms)</i>	400	400	400	200	1200	400
<i>Vergleichs- reize (ms)</i>	100, 200, 300 500, 600, 700	100, 200, 300 350, 450, 500 600, 700	100, 200, 300 500, 600, 700	50, 100, 150 250, 300, 350	900, 1000, 1100, 1300, 1400, 1500	100, 200, 300 500, 600, 700
<i>Versuchs- Training/Test</i>	50/200	40/200	20/200	20/200	20/200	2 x 20/200
<i>N (Versuchs- personen)</i>	40	20	20	20	20	18

Für alle statistischen Tests wurde ein α -Fehler-Niveau von 5% festgesetzt, d. h. eine Nullhypothese wurde erst dann verworfen, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner oder gleich 5% war.

Experiment 1

In Experiment 1 wurden durch Variation der Modalität von Trainings- und Testphase vier Bedingungen realisiert. Zwei unimodale Bedingungen, in denen die Modalität der Trainingsphase mit der Modalität der Testphase identisch war (AUD/AUD und VIS/VIS), wurden kontrastiert mit zwei crossmodalen Bedingungen, in denen die Modalitäten von Trainings- und Testphase verschieden waren (AUD/VIS und VIS/AUD).

Ableitung von psychologischen Hypothesen
und Aufstellung testbarer statistischer Hypothesen

Ableitung der psychologischen Hypothesen (PHn)

Zwei Hypothesen wurden mit Experiment 1 überprüft.

PH 1-1: Analog zu dem Befund, daß die Dauer akustischer Reize mit größerer Genauigkeit beurteilt wird als die Dauer optischer Reize (z. B. Wearden et al., 1998), wurde zunächst geprüft, ob die Leistung in der Testphase besser ist, wenn in der Trainingsphase die Standarddauer in der auditiven statt in der visuellen Modalität gelernt wurde. Nach der *scalar timing theory* ist die Antwort einer Versuchsperson (hier: eine „Gleich“-Antwort) determiniert durch den Vergleichsprozeß zwischen der aktuell dargebotenen Dauer (Vergleichsdauer) und der Gedächtnisrepräsentation der Standarddauer. In der von Wearden (1992) vorgeschlagenen modifizierten Entscheidungsregel bilden Versuchspersonen die Differenz zwischen einer Stichprobe aus der Verteilung der Werte für die Standarddauer im Langzeitgedächtnis, s^* , mit dem enkodierten Wert der gerade dargebotenen Vergleichsdauer, t . Diese an t relativierte Differenz wird anschließend zu einem bestimmten Entscheidungskriterium, b^* , in Beziehung gesetzt:

$$|s^* - t|/t < b^*.$$

Je größer die Variabilität innerhalb der Gedächtnisrepräsentation der Standarddauer, desto ungenauer sollten die Beurteilungen einer Versuchsperson sein. Angenommen, die Gedächtnisrepräsentation eines auditiv enkodierten Zeitintervalls sei weniger variabel als die eines visuell enkodierten Zeitintervalls (da die Diskrimination auditiv dargebotener Intervalle akkurater als die Diskrimination visuell dargebotener Intervalle ist), dann sollte die Diskriminationsleistung in der Testphase besser sein, wenn die Standarddauer in der Trainingsphase auditiv statt visuell dargeboten wurde.

PH 1-2: Zweitens wurde untersucht, ob in der Testphase die Dauer von Tönen länger geschätzt wird als die Dauer von physikalisch gleich langen optischen Stimuli. Wenn das Langzeitgedächtnis für Zeitintervalle eine direkte Transformation derjenigen Werte ist, die vorübergehend im Akkumulator oder im Kurzzeitgedächtnis zwischengespeichert wurden (Gibbon, 1991), dann sollten im crossmodalen Vergleich längere optische Stimuli als gleich lang wie der auditive Standard und kürzere akustische Stimuli als gleich lang wie der visuelle Standard beurteilt werden (vgl. Wearden et al., 1998). Der Generalisationsgradient (d. i. die prozentuale Häufigkeit von „Identifikationen“ eines dargebotenen Stimulus als Standard) sollte, verglichen mit den jeweiligen unimodalen Bedingungen, in der AUD/VIS-Bedingung nach rechts und in der VIS/AUD-Bedingung nach links verschoben sein.

Aufstellen der statistischen Hypothesen (SHn)

Für die Überprüfung einer psychologischen Hypothese ist es erforderlich, diese zunächst in eine statistische Hypothese zu überführen (vgl. Bortz, 1993, S. 105; Hager & Spies, 1991, S. 18). Der *PH 1-1* entspricht auf der statistischen Ebene die *SH 1-1* (s. Kasten 6 auf der nächsten Seite).

Kasten 6.

Von der *PH 1-1* zur *SH 1-1*.

PH 1-1: Die Diskriminationsleistung in der Testphase sollte in den Bedingungen mit auditiver Trainingsphase besser sein als in den Bedingungen mit visueller Trainingsphase.

SH 1-1: Die Häufigkeit korrekter Entscheidungen sollte in den Bedingungen mit auditiver Trainingsphase größer sei als in den Bedingungen mit visueller Trainingsphase. Formal ausgedrückt ergibt sich folgende gerichtete Unterschiedshypothese:

$$M(\Sigma h_{\text{Korr}}(\text{AUD}/\text{AUD}) + \Sigma h_{\text{Korr}}(\text{AUD}/\text{VIS})) > M(\Sigma h_{\text{Korr}}(\text{VIS}/\text{VIS}) + \Sigma h_{\text{Korr}}(\text{VIS}/\text{AUD})).$$

Aus der *PH 1-2* ergibt sich die folgende statistische Hypothese (s. Kasten 7).

Kasten 7.

Von der *PH 1-2* zur *SH 1-2*.

PH 1-2: Der Generalisationsgradient der AUD/VIS-Bedingung sollte, verglichen mit der AUD/AUD-Bedingung, nach rechts, und der Generalisationsgradient der VIS/AUD-Bedingung sollte, verglichen mit der VIS/VIS-Bedingung, nach links verschoben sein.

SH 1-2: Die Verschiebung der Gradienten kann über den Vergleich der jeweiligen Asymmetrie der Gradienten geprüft werden. Die relative Häufigkeit positi-

ver Antworten bei Darbietung von Vergleichsintervallen kürzer als die Standarddauer sollte in der AUD/VIS-Bedingung kleiner sein als in der VIS/AUD-Bedingung. Umgekehrt sollte die relative Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Vergleichsintervallen länger als die Standarddauer in der AUD/VIS-Bedingung größer als in der VIS/AUD-Bedingung sein. Der Grad an Asymmetrie läßt sich operationalisieren über die Differenz zwischen der relativen Häufigkeit positiver Antworten bei Intervallen größer als die Standarddauer und der relativen Häufigkeit positiver Intervalle bei Intervallen kleiner als die Standarddauer:

$$DIFF = (h_{POS}(700 \text{ ms}) + h_{POS}(600 \text{ ms}) + h_{POS}(500 \text{ ms})) - (h_{POS}(300 \text{ ms}) + h_{POS}(200 \text{ ms}) + h_{POS}(100 \text{ ms})),$$

mit h_{POS} = Häufigkeit positiver Antworten relativiert an der Anzahl der Stimulusdarbietungen.

Die *SH 1-2* läßt sich in zwei Einzelvergleiche zerlegen:

$$(SH\ 1-2a) \ M(DIFF_{AUD/VIS}) > M(DIFF_{AUD/AUD});$$

$$(SH\ 1-2b) \ M(DIFF_{VIS/VIS}) > M(DIFF_{VIS/AUD}).$$

Die *SH 1-2* gilt als angenommen, wenn beide Einzelvergleiche das erwartete Resultat erbringen (*strenges Kriterium*).



Methode

Versuchspersonen

40 Versuchspersonen nahmen an der Untersuchung teil und wurden zufällig den vier Versuchsbedingungen zugeteilt. Das mittlere Alter der Versuchspersonen betrug 24.95 Jahre ($SD = 4.48$; Range: 19 bis 38 Jahre). 72.5% waren Frauen, 27.5% Männer. Jeder Versuchsperson wurden DM 10 für die Teilnahme gezahlt.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Die Standarddauer war 400 ms. Nichtstandard-Vergleichsdauern waren 100 ms, 200 ms, 300 ms, 500 ms, 600 ms und 700 ms.

Instruktion und Versuchsablauf

Instruktion und Versuchsablauf entsprachen den im Abschnitt „Allgemeine Methode“ beschriebenen. Die Trainingsphase bestand aus 50 Versuchsdurchgängen, innerhalb derer die Darbietung der Standarddauer mit der Darbietung einer Vergleichsdauer gepaart wurde. In der anschließenden Testphase wurden den Versuchspersonen 200 Durchgänge präsentiert, in denen sie jeweils zu entscheiden hatten, ob die Dauer der Stimulusdarbietung der Standarddauer entsprach.

Das gesamte Experiment dauerte im Durchschnitt 38.38 Minuten ($SD = 3.31$).

Ergebnisse

Abbildung 15 (S. 115) zeigt die Verteilung der an der Darbietungshäufigkeit relativierten, durchschnittlichen Häufigkeiten positiver Antworten in der Testphase.

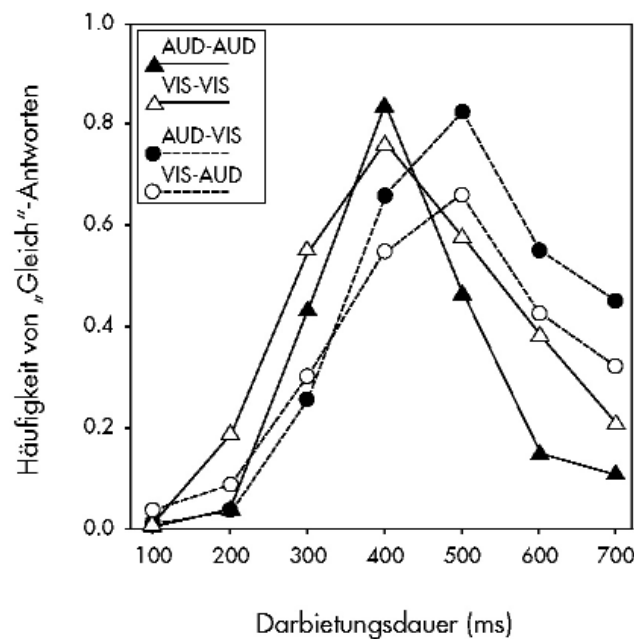


Abbildung 15. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 1. Dreiecke und durchgezogene Linien repräsentieren die Daten aus den unimodalen Bedingungen, Kreise und gestrichelte Linien die Daten aus den crossmodalen Bedingungen.

Innerhalb beider unimodalen Bedingungen (AUD/AUD, VIS/VIS) trat der Modalwert der Verteilung bei Darbietung der Standarddauer (400 ms) auf. Bei Darbietung längerer Dauern ist der Gradient der VIS/VIS-Bedingung etwas flacher als der Gradient der AUD/AUD-Bedingung.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus den unimodalen Bedingungen und im Widerspruch zu den erwarteten Ergebnissen zeigen die Gradienten *beider* crossmodalen Bedingungen (AUD/VIS, VIS/AUD) eine deutliche Verschiebung nach rechts auf der Abszisse. Der Modalwert beider Verteilungen liegt nicht bei Darbietung der Standarddauer, sondern bei Darbietung der nächst höheren Vergleichsdauer (500 ms). Das bedeutet, daß ein Stimulus von 500 ms häufiger als Standard „identifiziert“ wurde als die Standarddauer selbst.

Unterschiede zwischen den Gradienten wurden zunächst varianzanalytisch auf Signifikanz geprüft. Eine Varianzanalyse mit zwei Gruppierungsfaktoren (Modalität der Trainingsphase und Modalität der Testphase) und einem Meßwiederholungsfaktor (Dauer der Stimuli) ergab einen signifikanten Effekt der Dauer ($F(6, 216) = 77.90, p < .001, \eta_p^2 = .684$)

und eine signifikante Dauer \times Modalität der Trainingsphase \times Modalität der Testphase-Interaktion ($F(6, 216) = 11.43, p < .001, \eta_p^2 = .241$). Ferner zeigte sich ein signifikanter Effekt der Modalität der Testphase ($F(1, 36) = 8.71, p = .006, \eta_p^2 = .195$). Weder eine Dauer \times Modalität der Trainingsphase-Interaktion ($F(6, 216) = 1.37, p = .226, \eta_p^2 = .037$) noch eine Dauer \times Modalität der Testphase-Interaktion ($F(6, 216) = 1.45, p = .197, \eta_p^2 = .039$) noch eine Trainingsphase \times Testphase-Interaktion ($F(1, 36) = 1.34, p = .254, \eta_p^2 = .036$) wurde signifikant. Ein Effekt der Modalität der Trainingsphase trat nicht auf ($F(1, 36) = 0.43, p = .515, \eta_p^2 = .012$).

Prüfung der SH 1-1

Es folgt die Prüfung der gerichteten SH 1-1 via t-Test für unabhängige Stichproben. Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentualen korrekten Entscheidungen für jede Versuchsbedingung.

Tabelle 5. Mittelwerte und Standardabweichungen der prozentualen korrekten Entscheidungen für jede Versuchsbedingung.

<i>Bedingungen</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
AUD/AUD	0.8085	0.0975
VIS/VIS	0.7150	0.0749
AUD/VIS	0.6465	0.0521
VIS/AUD	0.6360	0.1200

Der t-Wert bleibt mit $t(38) = 1.507, p = .07$ knapp unterhalb des Signifikanzniveaus. Die SH 1-1 muß daher abgelehnt werden⁸. Der empirische Effekt ($d = M_1 - M_2 / SD$) beträgt $d_{\text{emp}} = 0.604$.

⁸ Nach Hager (1992) können statistische Hypothesen entweder beibehalten (im Falle der H_0) oder abgelehnt bzw. angenommen (im Falle der H_1) werden. Psychologische Hypothesen dagegen können sich bewähren (bzw. bestätigen) oder nicht bewähren (bzw. nicht bestätigen).

Prüfung der SH 1-2

Der Abbildung 15 kann leicht entnommen werden, daß die erwartete Verschiebung der Gradienten der crossmodalen Bedingungen nicht eingetreten ist. In Tabelle 6 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzwerte abgetragen.

Tabelle 6. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzwerte für jede Bedingung.

<i>Bedingungen</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
<i>AUD/AUD</i>	0.2470	0.9280
<i>VIS/VIS</i>	0.4200	0.8230
<i>AUD/VIS</i>	1.5250	0.3868
<i>VIS/AUD</i>	0.9850	0.8708

In allen Bedingungen ist im Mittel eine Verschiebung der Gradienten nach rechts aufgetreten. In den unimodalen Bedingungen (AUD/AUD und VIS/VIS) ist eine leichte rechtsseitige Verschiebung nach dem asymmetrischen Entscheidungskriterium von Wearden (1992) zu erwarten gewesen. Auch die starke Verschiebung des Gradienten der AUD/VIS-Bedingung scheint erwartungskonform zu sein (s. SH 1-2a). Hingegen ist die Richtung der Verschiebung des Gradienten der VIS/AUD-Bedingung hypothesenkonträr. Die Prüfung der Einzelvergleiche bestätigt diesen Eindruck. Zum Einzelvergleich D1: $M(DIFF_{AUD/VIS}) - M(DIFF_{AUD/AUD}) > 0$ gehören die folgende t-Statistik: $t(36) = 3.654$, $p < .001$, und der folgende empirische Effekt: $d_{emp} = 1.944$. Dem zweiten Einzelvergleich D2: $M(DIFF_{VIS/VIS}) > M(DIFF_{VIS/AUD})$ entsprechen dieser t-Wert: $t(36) = -1.615$, $p = .058$, und dieser Effekt: $d_{emp} = -0.667$.

Wegen des in der PH 1-2 festgelegten strengen Kriteriums braucht α nicht adjustiert zu werden (vgl. Hager, 1987, S. 174). Während die SH 1-2a angenommen werden kann, muß die SH 1-2b hingegen abgelehnt werden. Folglich muß die SH 1-2 insgesamt abgelehnt werden.

Diskussion

Mit Experiment 1 wurden zwei psychologische Hypothesen geprüft: Erstens wurde untersucht, ob auditiv enkodierte Zeitintervalle besser erinnert werden als visuell enkodierte Zeitintervalle (*PH 1-1*). Zweitens wurde überprüft, ob akustische Signale als länger andauernd als objektiv gleich lange optische Signale geschätzt werden (*PH 1-2*).

Was die *SH 1-1* anbelangt, zeigte sich kein Effekt der Trainingsmodalität auf die Erinnerungsleistung. Folglich hat sich die *PH 1-1* nicht bewährt. Möglicherweise eliminierte das Rückmelden der Richtigkeit der Antworten in der Trainingsphase den auditiv-visuellen Unterschied bzgl. der Variabilität der Gedächtnisrepräsentation der Standarddauer. Im Gegensatz dazu war die Testleistung eher abhängig von der Darbietungsmodalität in der Testphase, im übrigen ein Effekt, der vergleichbar ist mit dem „klassischen“ Modalitätseffekt in Dauerdiskriminationsexperimenten.

Darüberhinaus wurden akustische Stimuli nicht als länger andauernd beurteilt als optische Stimuli gleichen Ausmaßes. Die erwartete Verschiebung der Gradienten der crossmodalen Bedingungen trat nur in der AUD/VIS-Bedingung, nicht jedoch in der VIS/AUD-Bedingung auf. Im Gegenteil, in beiden Bedingungen zeigte sich eine eher gleichförmige Verschiebung der Gradienten nach rechts: Die Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung länger dauernder Stimuli war größer als die Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung kürzer dauernder Stimuli. Der Modalwert der Gradienten verschob sich ebenfalls von 400 ms nach 500 ms. Im Unterschied zum Gradienten der AUD/VIS-Bedingung war der Gradient der VIS/AUD-Bedingung jedoch etwas flacher. Die Verschiebung der Gradienten konnte durch die Ergebnisse der Meßwiederholungs-Varianzanalyse statistisch untermauert werden. Die dreifache Interaktion (Dauer \times Modalität der Trainingsphase \times Modalität der Testphase) bei gleichzeitigem Ausbleiben jeglicher Zweifachinteraktionen belegt den Unterschied der Leistung zwischen den unimodalen und den crossmodalen Bedingungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Darbietungsdauer des Stimulus. Auch der Einzelvergleich über die Differenz zwischen der VIS/AUD- und der VIS/VIS-Bedingung hinsichtlich der

Asymmetrie der Gradienten erbrachte einen hypothesenkonträren Befund. Somit hat sich auch die *PH 1-2* nicht bestätigt.

Die Versuchspersonen der crossmodalen Bedingungen unterschätzten systematisch die Darbietungsdauer der Stimuli. Dieser Effekt trat unabhängig von der Richtung des crossmodalen Vergleichs auf. Dies scheint darauf hinzudeuten, daß der Effekt nichts mit der Modalität *an sich*, sondern vielmehr mit dem *Wechsel* der Modalität zu tun hat. Der Effekt spiegelt sich auch in der Häufigkeit korrekter Entscheidungen wider: In den unimodalen Bedingungen wurden weniger Fehler gemacht als in den crossmodalen Bedingungen.

Warum beurteilten die Versuchspersonen in den crossmodalen Bedingungen akustische Stimuli nicht als länger andauernd als optische Stimuli? Der mit Experiment 1 erbrachte Befund steht im Widerspruch zu dem von Wearden und Mitarbeitern (Wearden et al., 1998, Experiment 1; vgl. S. 77f. dieser Studie), als Versuchspersonen in einer *temporal generalization*-Aufgabe ebenfalls die Dauer von Tönen mit der von Lichtsignalen vergleichen mußten. Offensichtlich können Differenzen hinsichtlich der Geschwindigkeit der inneren Uhr zwischen akustischen und optischen Stimuli nicht als Erklärung herhalten. Obwohl solche Differenzen nicht ausgeschlossen werden sollten, scheinen sie hier von einem anderen, bisher nicht berichteten Effekt überlagert worden zu sein.

Experiment 2

Mit Experiment 2 wurde der Blick ausschließlich auf den in Experiment 1 erhaltenen Verschiebungseffekt gerichtet. Aus diesem Grund wurden nur crossmodale Bedingungen (AUD/VIS, VIS/AUD) in die Untersuchung einbezogen. Um detaillierte Kenntnisse über das crossmodale Vergleichen von dargebotenen Dauern mit einem im Langzeitgedächtnis repräsentierten Standard zu gewinnen, wurde die Aufgabe schwieriger gestaltet. Nach Ferrara, Lejeune und Wearden (1997) verlangt eine schwierigere Generalisationsaufgabe eine genauere Bearbeitung, so daß die Zeitschätzung selbst empfindlicher und genauer wird: "(...) difficult conditions cause participants to process durations more carefully than they do in 'easy' conditions, so time discrimination becomes more sensitive" (p. 228). Um den Schwierigkeitsgrad zu erhöhen, hatten in Experiment 2 die mit dem Standard benachbarten Vergleichsintervalle einen von diesem kürzeren (50 ms statt 100 ms) Abstand. Folglich betrug das nächst kürzere Vergleichsintervall 350 ms und das nächst längere Vergleichsintervall 450 ms. Damit stieg die Anzahl der Nichtstandard-Vergleichsintervalle von sechs auf acht.

Ableitung von psychologischen Hypothesen und Aufstellung testbarer statistischer Hypothesen

Ableitung der psychologischen Hypothesen (PHn)

Mit Experiment 2 wurden zwei Hypothesen geprüft.

PH 2-1: Es sollte geprüft werden, ob der in Experiment 1 gefundene Verschiebungseffekt ein weiteres Mal in einem – wenn auch leicht veränderten – experimentellen Setting auftreten würde. Eine Replikation des Befundes spräche (1) für eine – bedingte⁹ – Generalisierbarkeit des Phänomens auf eine größere Anzahl an Versuchspersonen und (2) für eine

⁹ Aussagen über die Generalität eines Befundes lassen sich strenggenommen nur für diejenige Personenstichprobe und diejenigen Rand- und Rahmenbedingungen treffen, die in den konkreten Untersuchungen beteiligt bzw. verwirklicht waren.

– ebenfalls bedingte – Invarianz gegenüber Veränderungen im experimentellen Design.

PH 2-2: Bei Betrachtung der Gradienten der crossmodalen Bedingungen aus Experiment 1 fällt ein leichter Unterschied zwischen den Bedingungen insoweit auf, als der Gradient der VIS/AUD-Bedingung flacher als der Gradient der AUD/VIS-Bedingung war. Möglicherweise spiegelt dieser Unterschied einen Einfluß der unterschiedlichen Uhrgeschwindigkeiten wider. Ein Unterschied zwischen beiden Bedingungen sollte in einer schwierigeren Aufgabe leichter nachweisbar sein (vgl. Ferrara et al., 1997). Mit Experiment 2 sollte deshalb geprüft werden, ob sich zwischen beiden Bedingungen ein Unterschied nachweisen läßt.

Aufstellen der statistischen Hypothesen (SHn)

Der *PH 2-1* entsprechen die statistischen Hypothesen *SH 2-1a* und *SH 2-1b* (s. Kasten 8).

Kasten 8.

Von der *PH 2-1* zur *SH 2-1*.

PH 2-1: Der Unterschätzungsfehler aus Experiment 1 soll repliziert werden.

SH 2-1a: Es wird eine rechtsseitige Verschiebung der Gradienten der AUD/VIS- und der VIS/AUD-Bedingung erwartet. Analog zu Experiment 1 sollte sich die Verschiebung darin zeigen, daß die Modalwerte der Gradienten bei Darbietung eines Vergleichsintervalls auftreten, das größer als die Standarddauer (400 ms) ist.

SH 2-1b: Bei Darbietung von Vergleichsintervallen größer als die Standarddauer sollten in beiden Bedingungen mehr positive Antworten auftreten als bei Dar-

bietung von Vergleichsintervallen kleiner als die Standarddauer. Formal läßt sich die *SH 2-1b* wie folgt darstellen:

$$M(\Sigma h(\text{VD} > 400 \text{ ms})) > M(\Sigma h(\text{VD} < 400 \text{ ms})),$$

mit h = Häufigkeit positiver Antworten relativiert an der Anzahl der Stimulusdarbietungen und VD = Vergleichsdauer.

Der *PH 2-2* läßt sich die *SH 2-2* zuordnen.

Kasten 9.

Von der *PH 2-2* zur *SH 2-2*.

PH 2-2: Trotz richtungsgleicher Verschiebung sollten zwischen den Gradienten Unterschiede bestehen.

SH 2-2: Es wird ein Unterschied bzgl. der Häufigkeit positiver Antworten zwischen der AUD/VIS-Bedingung und der VIS/AUD-Bedingung erwartet. Diese ungerichtete Hypothese wird mittels einfaktorieller Varianzanalyse (Zwischensubjektfaktor „Bedingung“) mit Meßwiederholung auf einem Faktor („Stimulusdauer“) getestet. Der erwartete Unterschied sollte sich entweder in einem signifikanten Haupteffekt der Bedingung oder in einer signifikanten Interaktion zwischen den Faktoren „Bedingung“ und „Stimulusdauer“ niederschlagen.

Methode

Versuchspersonen

20 Versuchspersonen wurden zwei gleich großen Gruppen zufällig zugewiesen. Das Durchschnittsalter der Versuchsteilnehmer betrug 23.80 Jahre ($SD = 3.40$; Range: von 18 bis 31). 80% waren Frauen, 20 % waren Männer. Jeder Versuchsperson wurden für die Teilnahme DM 10 gezahlt.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Die verwendeten Hilfsmittel und Geräte (z. B. Hardware, Software) waren mit den in Experiment 1 verwendeten identisch. Das Stimulusmaterial war das gleiche wie in Experiment 1, mit dem Unterschied, daß die Anzahl der Nichtstandard-Vergleichsreize von sechs auf acht erhöht wurde und die Abstände der standardähnlichsten Intervalle zum Standard von 100 ms auf 50 ms verkürzt wurden. Es resultierten folgende Intervalle: 100 ms, 200 ms, 300 ms, 350 ms, 400 ms (Standarddauer), 450 ms, 500 ms, 600 ms und 700 ms.

Instruktion und Versuchsablauf

Instruktionen und Versuchsablauf stimmten mit denen von Experiment 1 weitgehend überein. Um die Darbietungswahrscheinlichkeit der Standarddauer ($p = .40$) gegenüber Experiment 1 unverändert zu lassen, wurde die Standarddauer innerhalb eines Blocks 16 mal präsentiert und jede Nichtstandard-Vergleichsdauer innerhalb desselben Blocks drei mal. Ein Block bestand damit aus 40 Versuchsdurchgängen. Während der Trainingsphase wurde den Versuchspersonen nur ein Block dargeboten, also 40 Versuchsdurchgänge gegenüber 50 in Experiment 1. Die Testphase bestand aus fünf Blöcken resp. 200 Versuchsdurchgängen. Die mittlere Dauer des Experiments betrug 36.95 Minuten ($SD = 7.09$).

Ergebnisse

Abbildung 16 zeigt die mittleren relativen Häufigkeiten positiver Antworten beider crossmodaler Gruppen (AUD/VIS, VIS/AUD).

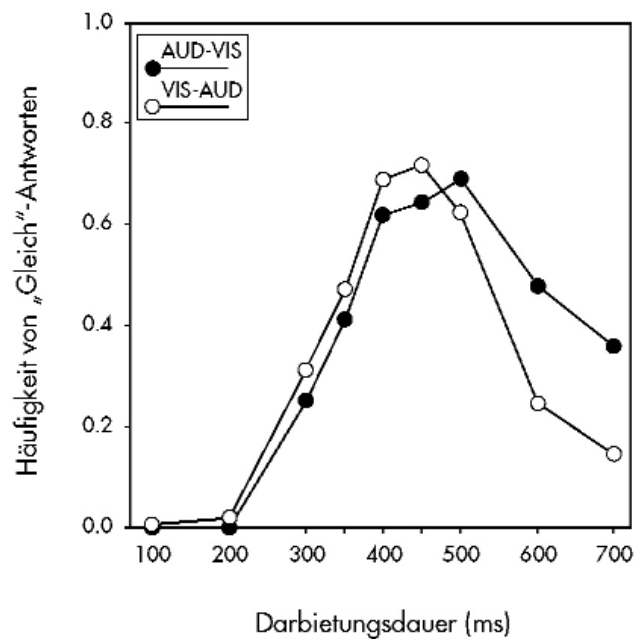


Abbildung 16. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 2. Gefüllte Kreise repräsentieren die Daten aus der AUD/VIS-Bedingung, ungefüllte Kreise die Daten aus der VIS/AUD-Bedingung.

Prüfung der SH 2-1a

Wie erwartet, zeigen beide Gradienten eine deutliche Verschiebung nach rechts. Bei Darbietung von Intervallen größer der Standarddauer traten mehr positive Antworten auf als bei Darbietung von Intervallen kleiner der Standarddauer. Der Modalwert der Gradienten lag in der VIS/AUD-Bedingung bei 450 ms und in der AUD/VIS-Bedingung bei 500 ms. Damit kann die SH 2-1a angenommen werden.

Prüfung der SH 2-1b

In beiden Bedingungen wurden häufiger positive Antworten gegeben, wenn die dargebotenen Intervalle größer als die Standarddauer waren als wenn sie kleiner als die Standarddauer waren. Die zugehörigen Mittelwerte (und Standardabweichungen) zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) über die Summe der prozentualen Häufigkeiten positiver Antworten bei Intervallen größer der Standarddauer ($\Sigma h(VD > 400 \text{ ms})$) und bei Intervallen kleiner der Standarddauer ($\Sigma h(VD < 400 \text{ ms})$) in Experiment 2.

	<i>AUD/VIS</i>	<i>VIS/AUD</i>
$\Sigma h(VD > 400 \text{ ms})$	2.186	1.992
	(0.4696)	(0.6509)
$\Sigma h(VD < 400 \text{ ms})$	0.5350	0.8730
	(0.4224)	(0.5496)

Die Mittelwertsdifferenzen wurden per t-Test für abhängige Stichproben auf Signifikanz geprüft und sind sowohl für die AUD/VIS-Bedingung ($t(9) = 6.797$, $p < .001$, $d_{\text{emp}} = 3.041$) als auch für die VIS/AUD-Bedingung ($t(9) = 4.723$, $p < .001$, $d_{\text{emp}} = 2.125$) statistisch bedeutsam. Folglich kann die SH 2-1b angenommen werden.

Prüfung der SH 2-2

Eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Meßwiederholung auf einem Faktor (Stimulusdauer) mit „Häufigkeit positiver Antworten“ als abhängiger Variable ergab einen signifikanten Effekt der Dauer ($F(8, 144) = 32.56$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .644$). Ein Effekt des Gruppierungsfaktors „Bedingung“ ($F(1, 18) = 0.54$, $p = .472$, $\eta_p^2 = .029$) sowie die Interaktion zwischen „Bedingung“ und „Stimulusdauer“ ($F(8, 144) = 1.82$, $p = .078$, $\eta_p^2 = .092$) wurden nicht signifikant. Dieses Ergebnis zeigt, daß bzgl. der relativen Häufigkeit positiver Antworten kein statistisch bedeutsamer Unterschied zwischen beiden Bedingungen feststellbar ist. Die SH 2-2 muß deshalb abgelehnt werden.

Diskussion

Mit Experiment 2 sollte untersucht werden, ob sich die Befunde aus dem vorangegangenen Experiment mit einer leicht modifizierten, i. e. schwierigeren Generalisationsaufgabe replizieren lassen. Ferner wurde geprüft, ob sich trotz einer möglichen gleichförmigen Verschiebung der Gradienten Unterschiede zwischen beiden crossmodalen Bedingungen nachweisen lassen.

Die Daten der Testphase von Experiment 2 bestätigen den in Experiment 1 berichteten Effekt einer systematischen Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle, wenn die Modalitäten von Trainings- und Testphase verschieden waren. In beiden Bedingungen zeigte sich auch bei einer im Schwierigkeitsgrad heraufgesetzten Aufgabe eine Verschiebung des Generalisationsgradienten nach rechts auf der Abszisse. Da beide aus der *PH 2-1* abgeleiteten statistischen Hypothesen angenommen werden konnten und sich darüberhinaus starke Effekte zeigten, kann die *PH 2-1* insgesamt ebenfalls als bestätigt angesehen werden.

Andererseits zeigte sich kein differentieller Einfluß der Bedingung auf das Antwortverhalten der Versuchspersonen. Auch wenn die Verschiebung des Gradienten der VIS/AUD-Gruppe etwas geringer war als die des Gradienten der AUD/VIS-Gruppe, hat sich die *PH 2-2* nicht bewährt.

Damit zeigt sich zweierlei: Erstens ist aufgrund der weitgehenden Replizierung des Befundes aus dem ersten Experiment deutlich geworden, daß der Unterschätzungs- bzw. Verschiebungseffekt ein empirisch stabiles Phänomen zu sein scheint. Zweitens scheint der Effekt gleichgültig gegenüber der Richtung des Vergleichs zu sein: Es spielt offenbar keine Rolle, ob zunächst in der auditiven Modalität gelernt und anschließend in der visuellen Modalität getestet wurde oder umgekehrt.

Experiment 3

Das Phänomen der relativen Unterschätzung von Darbietungsdauern akustischer und optischer Stimuli, wenn das Vergleichsintervall aus dem Langzeitgedächtnis erinnert werden muß, ist nach zusammenfassender Beurteilung der Ergebnisse der beiden vorangegangenen Experimente an das Zusammenspiel der Modalität von Trainings- und Testphase geknüpft. Bleibt die Modalität der Testphase unverändert gegenüber jener der Trainingsphase, tritt kein systematischer Verschätzungseffekt ein. Unterscheiden sich hingegen die Modalitäten beider Phasen, führt dies zu besagter Wirkung. Mit Experiment 3 sollten die möglichen Ursachen dieses Phänomens enger eingegrenzt werden. Es kann vermutet werden, daß der Effekt nicht allein den Wechsel der Modalität zur Bedingung hat, sondern vielmehr verursacht ist durch die Veränderung jedweder, dem Stimulus zuordenbarer Eigenschaft. Innerhalb einer Sinnesmodalität lassen sich verschiedene *Qualitäten* abgrenzen (Birbaumer & Schmidt, 1991, S. 309), so z. B. innerhalb der visuellen Modalität Helligkeit und Farben oder innerhalb der auditiven Modalität die Tonhöhen. Die Ergebnisse der beiden Experimente lassen offen, ob der Effekt auch *innerhalb einer Modalität* durch Variation der Stimulusqualität bewirkt werden kann.

In Experiment 3 wurde innerhalb der auditiven Modalität die Qualität der dargebotenen Stimuli zwischen Trainings- und Testphase variiert. Zwei Bedingungen mit identischer Qualität in Trainings- und Testphase (Sinus/Sinus, Rauschen/Rauschen) standen zwei Bedingungen mit wechselnder Qualität zwischen Trainings- und Testphase (Sinus/Rauschen, Rauschen/Sinus) gegenüber.

Ableitung von psychologischen Hypothesen

und Aufstellung testbarer statistischer Hypothesen

Mit Experiment 3 wurde die Hypothese geprüft, ob ein *Wechsel der Stimulusqualität* zwischen Trainings- und Testphase einen Einfluß auf die Diskriminationsleistung in der Testphase bewirkt.

Ableitung der psychologischen Hypothesen (PHn)

Bevor die Hypothesen im einzelnen aufgestellt werden, ist zunächst eine Operationalisierung der Stimulusqualität zu entwickeln. Grundsätzlich lassen sich verschiedene Qualitäten sowohl innerhalb der visuellen als auch innerhalb der auditiven Modalität ausmachen. Nun werden Dauern akustischer Reize im allgemeinen besser als Dauern optischer Reize diskriminiert, d. h. die unsystematische Varianz bei der Diskriminierung auditiv enkodierter Intervalle ist vergleichsweise geringer (vgl. Wearden et al., 1998). Daher sollte ein systematischer Effekt – wie z. B. die Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle – dann am ehesten zu entdecken sein, wenn die unsystematische Varianz möglichst klein gehalten wird. Aus diesem Grund scheint es sinnvoll, die Variation der Stimulusqualität innerhalb der auditiven statt innerhalb der visuellen Modalität durchzuführen, also z. B. den Einfluß der Veränderung der *Frequenz akustischer Signale* zwischen Trainings- und Testphase zu bestimmen.

Als nächstes stellt sich die Frage, welche beiden Signalfrequenzen miteinander kontrastiert werden sollen. Je größer der Unterschied zwischen den Frequenzen, desto eher ist ein Effekt zu vermuten. Der wahrscheinlich größte erzeugbare Unterschied auf der Frequenzdimension zwischen akustischen Signalen ist der zwischen einem Ton bestimmter Frequenz und *weißem Rauschen*. Weißes Rauschen enthält ein Frequenzspektrum von 20 Hz bis 20 kHz, also das ganze hörbare Frequenzspektrum. Es ist damit – analog zum weißen Licht – die Summe aller möglichen hörbaren Frequenzen. Zur Erzielung des größtmöglichen Kontrastes wurde daher die Stimulusqualität der auditiven Modalität operationalisiert durch einen Ton (Sinuston mit 500 Hz) und weißes Rauschen. Frequenz und Lautstärke des Sinustons wurden zum Zwecke besserer Vergleichbarkeit denen aus Experiment 1 und 2 angepaßt.

Abschließend ist noch ein Sachverhalt zu benennen, der als Konfundierungsproblem aufgefaßt werden kann. Es ist nämlich nicht auszuschließen, daß nicht nur unterschiedliche Qualitäten (Ton versus Rauschen) eine mögliche Wirkung zeigen, sondern ebenso denkbar

ist ein Effekt der Reizintensität (i. e. die Lautstärke des Stimulus). Ein Weg zur Behebung dieses möglichen Konfundierungsproblems ist die Forderung nach subjektiver Gleichheit der Lautstärken beider Stimuli. Zu diesem Zweck wurden vor der Untersuchung vier Versuchspersonen (von denen eine der Verfasser war) gebeten, auf einem einfachen Soundbearbeitungsprogramm („Goldwave 4.0“ von KELLY Data GmbH) bei gegebener Lautstärke des Tons die Lautstärke des Rauschens so zu adjustieren, daß beide Schallereignisse subjektiv gleich laut klingen. Die (festgesetzte) interne Lautstärke des Tons, gemessen als Schalleistungspegel (dB), betrug -3.01 dB ($rms = 0.7071$), die über die vier Versuchspersonen gemittelte adjustierte Lautstärke des Rauschens -13.19 dB ($rms = 0.2191$, $SD = 0.0214$)¹⁰.

Nach der nun erfolgten Operationalisierung der unabhängigen Variablen „Stimulusqualität“ können zwei psychologischen Hypothesen formuliert werden, die sich hinsichtlich ihrer Stärke unterscheiden.

PH 3-1: Es wird ein Einfluß des Wechsels der Stimulusqualität zwischen Trainings- und Testphase auf die Diskriminationsleistung in der Testphase erwartet (*schwache Hypothese*).

PH 3-2: Ferner wird erwartet, daß im Falle variierender Stimulusqualitäten eine Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle in der Testphase auftritt, während ein solcher Effekt bei gleichen Stimulusqualitäten nicht erscheinen sollte (*starke Hypothese*).

¹⁰ Die Berechnung des Schalleistungspegels erfolgte auf der Grundlage des sog. root mean square (*rms*). Das *rms* ist eine einheitenlose Größe, die die durchschnittliche Amplitude eines Schallereignisses beschreibt. Das *rms* berechnet sich in drei Schritten. Zunächst werden alle einzelnen Amplitudenwerte („samples“ beim digitalen Audio) quadriert und anschließend aufsummiert. Hiernach wird der Mittelwert aus den quadrierten „samples“ berechnet. Schließlich wird die Quadratwurzel aus dem Mittelwert gezogen. Die formale Definition des *rms* lautet: $rms_{Amplitude} = [1/N \cdot \sum(x(i))^2]^{1/2}$. Die Logarithmierung des *rms* ergibt den Schalleistungspegel nach folgender Gleichung: Schalleistungspegel (dB) = $20 \cdot \log rms$. Da die Amplitudenwerte hier zwischen +1 und -1 liegen und das *rms* dadurch nur Werte zwischen null und eins annehmen kann, resultiert ein negativer dB-Wert.

Aufstellen der statistischen Hypothesen (SHn)

Der *PH 3-1* entspricht die statistische Hypothese *SH 3-1*.

Kasten 10.

Von der *PH 3-1* zur *SH 3-1*.

PH 3-1: Bei wechselnder Stimulusqualität sollte die Diskriminationsleistung in der Testphase anders sein als bei konstanter Stimulusqualität.

SH 3-1: Varianzanalytisch sollte sich ein Haupteffekt zu Lasten der Stimulusqualität (wechselnd versus konstant) oder eine Interaktion zwischen den Faktoren „Stimulusqualität“ und „Stimulusdauer“ bezüglich der relativen Häufigkeiten positiver Antworten zeigen.

Die *PH 3-2* führt zur statistischen Hypothese *SH 3-2*.

Kasten 11.

Von der *PH 3-2* zur *SH 3-2*.

PH 3-2: Bei variierenden Stimulusqualitäten sollte eine Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle in der Testphase auftreten.

SH 3-2: Die Differenz zwischen der mittleren prozentualen Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Vergleichsintervallen größer als die Standarddauer und der mittleren prozentualen Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Vergleichsintervallen kleiner als die Standarddauer:

$$DIFF = (h_{POS}(700 \text{ ms}) + h_{POS}(600 \text{ ms}) + h_{POS}(500 \text{ ms})) - \\ (h_{POS}(300 \text{ ms}) + h_{POS}(200 \text{ ms}) + h_{POS}(100 \text{ ms})),$$

mit h_{POS} = Häufigkeit positiver Antworten relativiert an der Anzahl der Stimulusdarbietungen,

sollte in den Bedingungen mit unterschiedlicher Stimulusqualität größer sein als in den Bedingungen mit gleicher Stimulusqualität.

Formal läßt sich die SH 3-2 wie folgt darstellen:

$$M_{DIFF}(\text{Sinus/Rauschen} + \text{Rauschen/Sinus}) \\ > M_{DIF}(\text{Sinus/Sinus} + \text{Rauschen/Rauschen}).$$

Methode

Versuchspersonen

20 Versuchspersonen wurden vier gleich großen Gruppen zufällig zugewiesen. Das Durchschnittsalter der Versuchsteilnehmer betrug 25.4 Jahre ($SD = 4.03$; Range: 20 bis 35 Jahre). 80% waren Frauen, 20 % waren Männer. Jede Versuchsperson erhielt für die Teilnahme DM 10.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Hilfsmittel und Geräte entsprachen den beiden vorigen Experimenten. Ebenso wie dort wurde ein 500 Hz-Sinuston (-3.01 dB) als Trägersignal für die Zeitintervalle verwendet. Zusätzlich wurden die Zeitintervalle über weißes Rauschen (-13.19 dB) dargeboten. Beide Signale wurden via Kopfhörer binaural präsentiert. Die zu lernende Standarddauer war 400 ms. Die Anzahl der Nichtstandard-Vergleichsreize war sechs. Insgesamt ergaben sich folgende Intervalle: 100 ms, 200 ms, 300 ms, 400 ms (Standarddauer), 500 ms, 600 ms und 700 ms.

Instruktion und Versuchsablauf

Instruktionen und Versuchsablauf stimmten mit denen von Experiment 1 und 2 weitgehend überein. Die Darbietung der Versuchsdurchgänge erfolgte in Blöcken, innerhalb derer die Abfolge der Versuchsdurchgänge randomisiert war. Ein Block bestand aus 10 Versuchsdurchgängen. Während der Trainingsphase erhielten die Versuchspersonen zwei Blöcke. Die Testphase bestand aus 20 Blöcken resp. 200 Versuchsdurchgängen.

Die mittlere Gesamtdauer des Experiments betrug 34.6 Minuten ($SD = 7.89$).

Ergebnisse

Abbildung 17 zeigt die mittleren relativen Häufigkeiten positiver Antworten in Abhängigkeit von der dargebotenen Dauer der vier untersuchten Gruppen in der Testphase.

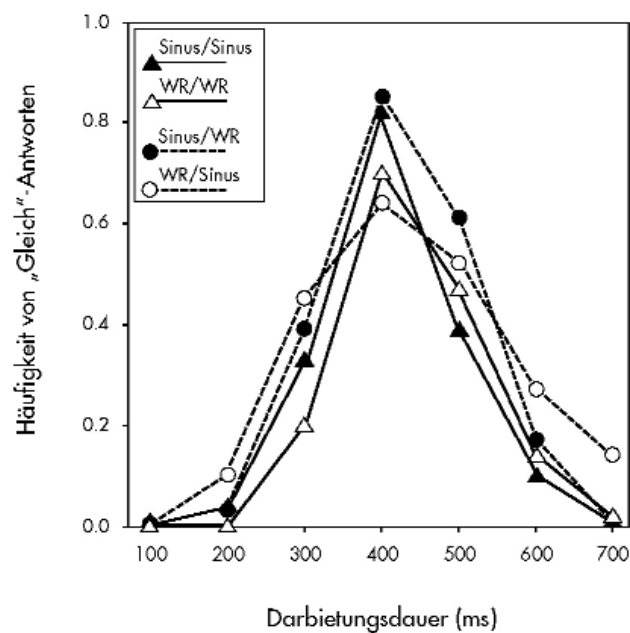


Abbildung 17. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 3. Dreiecke und durchgezogene Linien repräsentieren die Daten aus den Bedingungen mit einheitlicher Stimulusqualität, Kreise und gestrichelte Linien die Daten aus den Bedingungen mit wechselnder Stimulusqualität.

Alle Gradienten haben ihr Maximum bei Darbietung der 400 ms-Standarddauer. Die Gradienten der Bedingungen mit konstanter Stimulusqualität sind schmäler als die Gradienten der Bedingungen mit variierender Stimulusqualität. Ferner sind die Gradienten der

Bedingungen, in denen in der Trainingsphase Weißes Rauschen dargeboten wurde, niedriger als diejenigen mit einem Sinuston als Trainingsstimulus.

Prüfung der SH 3-1

Ob die augenscheinlichen Differenzen zwischen den Bedingungen statistisch bedeutsam sind, wurde über eine Varianzanalyse der relativen Häufigkeit positiver Antworten (mit der Variablen „Stimulusqualität“ als zweifach gestufter Gruppierungsfaktor und der Variablen „Dauer“ als Meßwiederholungsfaktor) ermittelt. Es zeigte sich ein signifikanter Effekt der Dauer ($F(6, 108) = 47.15, p < .0001, \eta_p^2 = .724$) und ein signifikanter Haupteffekt zu Lasten der Stimulusqualität ($F(1, 18) = 10.55, p = .004, \eta_p^2 = .369$). Die Dauer \times Stimulusqualität-Interaktion war nicht signifikant: $F(6, 108) = 0.631, p = .705, \eta_p^2 = .034$.

Der signifikante Haupteffekt der Stimulusqualität ist darauf zurückzuführen, daß in den Bedingungen mit wechselnder Qualität im Durchschnitt insgesamt häufiger bei Darbietung eines Nichtstandard-Vergleichsintervalls mit „Gleich“ geantwortet wurde als in den Gruppen mit einheitlicher Stimulusqualität. Das wird durch einen Blick auf Tabelle 8 deutlich.

Tabelle 8. Mittelwerte und Standardabweichungen (in Klammern) der mittleren Treffer- und Falsche Alarm-Raten in den Bedingungen mit konstanter und variierender Stimulusqualität.

<i>Bedingung</i>	<i>Treffer</i>	<i>F. Alarme</i>
<i>Konstante Qualität</i>	0.7600 (0.1533)	0.2310 (0.0455)
<i>Variierende Qualität</i>	0.7463 (0.2174)	0.2987 (0.0478)

Tabelle 8 zeigt die über alle Nichtstandard-Vergleichsintervalle gemittelten relativen Häufigkeiten positiver Antworten (die der mittleren Rate der Falschen Alarme entsprechen)

verglichen mit den mittleren relativen Häufigkeiten positiver Antworten bei Darbietung der Standarddauer (entspricht der mittleren Trefferrate)¹¹.

Für eine Signifikanzprüfung muß die Irrtumswahrscheinlichkeit korrigiert werden, da sowohl die Treffer als auch die Falschen Alarme Bestandteil der zuvor durchgeführten Varianzanalyse waren und damit innerhalb derselben Hypothese über eine abhängige Variable zweimal getestet wird. Die Korrektur erfolgt nach Bonferoni über $\alpha_{\text{korr}} = \alpha/m = .025$, mit $m = \text{Anzahl der Tests} = 2$ (vgl. Hager, 1987, S. 172). Während der Unterschied bezüglich der Häufigkeit Falscher Alarme zwischen den Bedingungen mit konstanter Stimulusqualität und den Bedingungen mit wechselnder Stimulusqualität auf α -adjustiertem Niveau statistisch bedeutsam ist ($t(18) = -3.248, p = .004, d_{\text{emp}} = 1.45$), bleibt der Unterschied seitens der Treffer unterhalb des korrigierten Signifikanzniveaus: $t(18) = 0.163, p = .872, d_{\text{emp}} = -0.074$. Das bedeutet, daß die Häufigkeit Falscher Alarme in den Bedingungen mit wechselnder Stimulusqualität im Vergleich zu den Bedingungen mit konstanter Stimulusqualität signifikant anstieg, während die Häufigkeit der Treffer nahezu unverändert blieb.

Insgesamt folgt daraus, daß die *SH 3-1* angenommen werden kann.

¹¹ Von einer Transformation der empirischen Treffer- und Falsche-Alarm-Raten in Maße der Signalentdeckungstheorie (d' und c ; vgl. Macmillan & Creelman, 1991) wird hier aus folgendem Grund abgesehen. Da beide Maße auf probabilistische Verteilungen auf einer angenommenen internen Empfindungsdimension rekurrieren (d' als Differenz zwischen der Verteilung „bekannter“ Items und der Verteilung „neuer“ Items, c als Entscheidungskriterium, das die Empfindungsdimension in zwei Bereiche teilt), sollten entsprechend die Treffer und die Falschen Alarme innerhalb der Verteilung „bekannter“ Items (d. h. der Standarddauer) resp. innerhalb der Verteilung „neuer“ Items (d. h. der Nichtstandard-Vergleichsdauern) Werte oberhalb des Kriteriums widerspiegeln. Da in der *temporal generalization*-Aufgabe die Falschen Alarme *Zusammenfassungen* der positiven Antworten bei Darbietung *unterschiedlicher* (längerer wie kürzerer) Vergleichsdauern sind, kann von einer einheitlichen Verteilung „neuer“ Items nicht ausgegangen werden, sondern muß stattdessen jedem einzelnen Vergleichsreiz eine eigene Verteilung zugeschrieben werden (vgl. Hébert, 1973; Hirsh, 1979). Die Aufsummierung einzelner Distanzen d'_i zwischen diesen Verteilungen zu einem sinnvoll zu interpretierenden Gesamtmaß setzt – neben der ebenfalls als fragwürdig geltenden Homogenität der Varianzen der einzelnen Verteilungen – allerdings voraus, daß die Verteilung der „bekannten“ Items einen Endpunkt auf der Empfindungsdimension bildet. Dies ist jedoch dann nicht der Fall, wenn ein Vergleichsreiz insgesamt häufiger als Standard „identifiziert“ wird als der Standard selbst.

Prüfung der SH 3-2

Bereits der Blick auf die Gradienten läßt erkennen, daß keine systematische Verschiebung und damit keine überzufällig unterschiedliche Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle stattgefunden hat. Tabelle 9 gibt das unterschiedliche Ausmaß der Asymmetrie der Gradienten wieder.

Tabelle 9. Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen den relativen Häufigkeiten positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen größer als die Standarddauer und den relativen Häufigkeiten positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen kleiner als die Standarddauer.

<i>Bedingung</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
<i>Konstante Qualität</i>	0.2770	0.4965
<i>Variierende Qualität</i>	0.3750	0.9256

Obwohl in den Bedingungen mit wechselnder Stimulusqualität der Grad an Asymmetrie des Gradienten tatsächlich im Mittel etwas größer ist als in den Bedingungen mit konstanter Stimulusqualität, fällt der Unterschied im Vergleich zur Streuung eher gering aus. Dementsprechend führt der t-Test über unabhängige Stichproben zu keinem signifikanten Ergebnis: $t(18) = -0.295$, $p = 0.386$, $d_{\text{emp}} = 0.098$. Hypothese SH 3-2 muß daher abgelehnt werden.

Diskussion

Wie erwartet, führte der Wechsel der Stimulusqualität zwischen Trainings- und Testphase zu einer statistisch bedeutsamen Veränderung der Diskriminationsleistung in der Testphase. Unterschieden sich beide experimentellen Phasen hinsichtlich der Stimulusqualität, war die Häufigkeit eines Falschen Alarms größer als bei gleicher Stimulusqualität in

Trainings- und Testphase. Damit kann die schwache *PH 3-1* als bestätigt gelten. Somit scheint die Repräsentation der Standarddauer nicht nur an die Modalität, sondern auch an die intramodale Stimulusqualität gebunden zu sein. Dennoch war das Ausmaß der Unterschätzung von Zeitintervallen zwischen den Bedingungen nicht unterschiedlich ausgeprägt. Damit hat sich die starke *PH 3-2* nicht bewährt. Offenbar geht der Diskriminationsnachteil in den Bedingungen mit unterschiedlicher Stimulusqualität auf ein anderes Konto als der Diskriminationsnachteil in den crossmodalen Bedingungen der Experimente 1 und 2.

Der Anstieg der Rate der Falschen Alarme (bei gleichbleibender Trefferrate) in den Bedingungen mit wechselnder Stimulusqualität zeigt eine größere Varianz in der Testphase an und kann als schlechtere Diskriminierbarkeit der Intervalle interpretiert werden. Dennoch ist auch eine Veränderung des Entscheidungskriteriums als Erklärung möglich. Steigt bspw. der Wert des Kriteriums b an, vergrößert sich der Toleranzbereich, innerhalb dessen ein vom Standard abweichendes Intervall noch als solcher bewertet wird, ohne daß die Häufigkeit korrekter Entscheidungen bei Darbietung des Standards davon tangiert wäre. Daraus resultierte ein Generalisationsgradient, der im Vergleich zu einem Gradienten mit strengerem Kriterium flacher wäre. Die Interpretation der Zunahme Falscher Alarme als Resultat eines laxeren Entscheidungskriteriums verweist auf eine eher kognitive Komponente im Zeitverarbeitungsprozeß. Möglicherweise führte die Veränderung der Stimulusqualität zwischen den Bedingungen zu einer weniger gewissenhaften Bearbeitung der Aufgabe seitens der Versuchspersonen. Gleichwohl demonstrieren die Befunde zweifelsfrei, daß die Verschiebung des Gradienten, die in Experiment 1 und 2 festzustellen war, nicht repliziert werden konnte. Es scheint daher plausibel anzunehmen, daß der Zeitverarbeitungsprozeß durch den Wechsel der *intramodalen* Stimulusqualität nicht wesentlich gestört wurde. Es ist deshalb an dieser Stelle sicherlich nicht allzu spekulativ, davon auszugehen, daß der Unterschätzungseffekt bei unterschiedlichen Lern- und Abrufbedingungen an die *Modalität* der Zeitintervalle gebunden ist.

Eine vorläufige Erklärung für das Fehlen eines systematischen Schätzfehlers im intramodalen Stimulusvergleich und das Auftreten eines solchen im crossmodalen Vergleich

könnte ein Modell von Grondin und Rousseau (1991) liefern. In diesem wird die Verarbeitung von Zeitintervallen zwei unterschiedlichen Prozessoren zugeschrieben: einem *spezifischen* Prozessor, der innerhalb einer Modalität arbeitet, und einem *aspezifischen* Prozessor, der für die Diskriminierung von intermodalen Intervallen zuständig ist. Während der spezifische Prozessor wenig Ressourcen beansprucht und weitgehend automatisch arbeitet, benötigt der aspezifische Prozessor hingegen die Unterstützung von kontrollierter Aufmerksamkeit. Fluktuiert die aufgebrachte Aufmerksamkeit während der Verarbeitung eines Zeitintervalls, führt dies zu einer Zunahme an Beurteilungsfehlern zulasten des aspezifischen Prozessors. Daraus folgt, daß nur der aspezifische Prozessor sensitiv gegenüber Aufmerksamkeitsschwankungen ist und dessen Funktion durch eben diese gestört werden kann. Bezogen auf die Befunde der Experimente 1 und 2 heißt das, daß in den crossmodalen Bedingungen aufgrund des Wechsels der Modalität möglicherweise Aufmerksamkeitsschwankungen während der Darbietung der Intervalle stattgefunden haben, die zu einer Störung des Verarbeitungsprozesses (aspezifischer Prozessor) geführt haben. Ähnliche Aufmerksamkeitsschwankungen wären hingegen nach dem Modell von Grondin und Rousseau in Experiment 3 nicht zu erwarten gewesen, da für die Diskrimination der Intervalle nur der spezifische Prozessor benötigt wurde.

Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse aus den Experimenten 1-3 und Entwicklung eines theoretischen Modells zur Quantifizierung des gefundenen Effekts

Der wesentliche Befund aus den vorangegangenen Experimenten ist zweifelsohne der Umstand, daß die erinnerte Dauer eines Stimulus dann einen systematischen, asymmetrischen Schätzfehler enthält, wenn die Erinnerungsmodalität von der vorangegangenen Lernmodalität verschieden ist. Daß dieser Effekt in zwei Experimenten (Experiment 1 und 2) mit voneinander unabhängigen Stichproben gefunden wurde, spricht für die Stabilität des Fehlers; daß er in Experiment 3 nicht repliziert wurde, spricht dafür, daß der dort beobachtete symmetrische Schätzfehler als Folge eines intramodalen Wechsel der Stimulusqualität einer anderen Entstehungsursache zuzuschreiben ist. Eine Deutung des Befundes an dieser Stelle zu elaborieren, scheint aufgrund der bislang geringen Informationsmenge über die Charakteristika des Schätzfehlers verfrüht. Stattdessen sollten für ein tieferes Verständnis die besonderen Eigentümlichkeiten dieses Fehlers aufgeklärt werden. Zwei einfache und dennoch gewichtige Fragen standen daher im Vordergrund der weiteren Untersuchung. Da ein Schätzfehler wesentlich durch sein Ausmaß bestimmt ist, sollte erstens die Frage geklärt werden, wie groß der Fehler ist, d. h. um welchen Betrag die dargebotenen Zeitintervalle in der Testphase unterschätzt wurden. Betrachtet man die Generalisationsgradienten der Experimente 1 und 2, so fällt auf, daß das Ausmaß der Unterschätzung in den crossmodalen Bedingungen in beiden Experimenten mit etwa 50 bis 100 ms beziffert werden kann. Es kann deshalb vermutet werden, daß das Ausmaß des Fehlers nicht zufällig variierte, sondern in beiden Experimenten im Mittel einen fixen Betrag hatte. Es ist daher zweitens zu untersuchen, ob der Schätzfehler systematisch mit der jeweiligen Standarddauer variiert, in diesem Fall also ein proportionaler Fehler wäre, oder ob der Schätzfehler unabhängig von der Standarddauer ist und deshalb als additiver bzw. konstanter Fehler betrachtet werden kann. Besonders die zweite Fragestellung ist für das Verständnis des dem Fehler zugrunde-

liegenden Mechanismus von Bedeutung. Ein *proportionaler* Fehler würde auf einen Mechanismus deuten, dessen Wirkung mit zunehmender Dauer des zu beurteilenden Intervalls größer würde, also innerhalb des Zeitverarbeitungssystems nur einer Komponente zugeschrieben werden kann, die selbst sensitiv gegenüber der zu beurteilenden Dauer ist. In der *scalar timing theory* sind dies vor allem der Schrittmacher, der Akkumulator und möglicherweise Prozesse des Einlesens eines enkodierten Intervalls in das Gedächtnis (vgl. Meck, 1983). Ein *additiver* Fehler hingegen würde auf einen Mechanismus schließen lassen, der – da gegenüber der Dauer des Intervalls invariant – nicht zeitsensitiv ist. Im Rahmen der *scalar timing theory* kommen dafür der Schalter (vgl. Wearden, 1999, p. 8) und Gedächtnisabrufprozesse (die allerdings in dieser Theorie nicht weiter spezifiziert sind) in Frage.

Nachfolgend wird der Versuch unternommen, den Befund des systematischen Schätzfehlers mit der dieser Studie zugrunde gelegten *scalar timing theory* zu vereinbaren. Um dies zu bewerkstelligen, muß – da die *scalar timing theory* eine quantitative Theorie ist und die vorangestellten Leitfragen dies erfordern – der Fehler zunächst selbst quantifiziert werden.

Wie erinnerlich, entscheidet sich nach der *scalar timing theory* (vgl. Wearden, 1992) ein Individuum für die Gleichheit zweier Zeitintervalle, wenn

$$(I) \quad |s^* - t| / t < b^*,$$

mit s^* als einer Stichprobe aus der Werteverteilung der Standarddauer im Referenzgedächtnis, t als wahrgenommene Dauer des Vergleichsreizes, und b^* als Stichprobe der Verteilung von Werten des Entscheidungskriteriums. Wie kann nun das Faktum der Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle innerhalb dieser Verhaltensformel dargestellt werden? Grundsätzlich kommen dafür zwei Möglichkeiten in Betracht: Erstens könnte im crossmodalen Vergleich s^* größer geworden sein. Eine Vergrößerung von s^* würde bedeuten, daß der linke Term von (I) erst bei Intervallen größer der physikalischen Standarddauer minimiert und damit die Wahrscheinlichkeit einer „Gleich“-Antwort erhöht würde. Zweitens könnte t im crossmodalen Vergleich kleiner werden. Eine Verkleinerung von t hätte den gleichen Effekt: Das dargebotene Intervall würde kleiner wahrgenommen werden, als es tatsächlich ist, so daß eine Verkleinerung des linken Terms erst bei Intervallen oberhalb der Standarddauer erfolgte.

Prinzipiell kann der Fehler additiver oder multiplikativer (proportionaler) Natur sein. Demnach kann eine Verringerung von t bzw. Vergrößerung von s ¹² entweder durch Addition oder durch Multiplikation eines Fehlerwertes erwirkt werden. Tabelle 10 stellt diesen Sachverhalt schematisch dar.

Tabelle 10. Vierfelderschema möglicher Ursachenzuschreibungen für den Unterschätzungseffekt in den Experimenten 1 und 2.

<i>Der Fehler sei:</i>	<i>Der Fehler sei zu lokalisieren bei:</i>	
	<i>Wahrgenommene Dauer t</i>	<i>Referenzdauer s</i>
<i>additiv</i>	$t - f$	$s + f$
<i>proportional</i>	$t \cdot F$	$s \cdot 1/F$

Anmerkung. f = additiver Fehler; F = proportionaler Fehler; t = wahrgenommene Dauer; s = gespeicherte Referenzdauer.

Der Verfasser geht davon aus, daß in den crossmodalen Bedingungen die Verschiebung des Gradienten das Ergebnis zweier voneinander unabhängiger Faktoren gewesen ist: erstens unterschiedliche Uhrgeschwindigkeiten (vgl. Penney et al., 1998, 2000; Wearden et al., 1998), zweitens eine Verringerung der wahrgenommenen Dauer t resp. eine Vergrößerung der gespeicherten Dauer s . Der Einfachheit halber und um den Leser nicht mit überbordender Arithmetik zu verwirren, wird im weiteren nur die Ableitung der Fehlergröße aus der Annahme, daß der Schätzfehler mit der wahrgenommenen Dauer t zusammenhängt, vorgenommen. Die alternative Hypothese (nämlich daß der Schätzfehler mit einer Veränderung von s korrespondiert) bleibt hingegen nicht unberücksichtigt und wird samt mathematischer Ableitung in Appendix 3 dargestellt. Wie sich dort zeigt, ist die theoretische Größe des Fehlers praktisch unabhängig von der zugrundegelegten Annahme.

¹² Der Einfachheit halber wird im folgenden auf die *-Indizierung der Variablen verzichtet.

Bestimmung der Fehlergröße unter der *Additivitätshypothese*

Für den crossmodalen Vergleich von Zeitintervallen gilt eine Besonderheit: Die auditive Uhr ist schneller als die visuelle Uhr. Penney et al. (1998) beziffern den Unterschied zwischen der visuellen und der auditiven Modalität mit dem Faktor 0.92, d. h. die Geschwindigkeit, mit der die visuelle Uhr Impulse emittiert und akkumuliert, ist um 8% geringer als die der auditiven Uhr (p. 186). Ist die Standarddauer optisch und die Vergleichsdauer akustisch (Bedingung VIS/AUD), bedeutet dies, daß die Vergleichsdauer um 8% länger wahrgenommen wird als ein optisches physikalisches Äquivalent. Bspw. wird bei einer optischen Standarddauer von 400 ms ein ebenso langes akustisches Vergleichsintervall um 8% länger wahrgenommen, weil während des akustischen Intervalls mehr Impulse akkumuliert werden als während des optischen Intervalls. Der Umstand der unterschiedlichen Uhrgeschwindigkeiten kann folgendermaßen in die Wearden-Formel integriert werden. Es folgt für die VIS/AUD-Bedingung:

$$(II) \quad \frac{|s - 1/0.92 \, t|}{1/0.92 \, t} < b.$$

Und für die AUD/VIS-Bedingung:

$$(III) \quad \frac{|s - 0.92 \, t|}{0.92 \, t} < b.$$

Wenn die Vergleichsdauer um einen bestimmten Betrag unterschätzt wird, dann sei dies – unter der Annahme der Additivität – äquivalent mit der *Subtraktion* eines zu bestimmenden Fehlerwertes f von der wahrgenommenen Dauer t (s. o.). Auch dieser Umstand kann in die Wearden-Formel integriert werden. Für die VIS/AUD-Bedingung gilt:

$$(IV) \quad \frac{|s - (1/0.92 \, t - f)|}{1/0.92 \, t - f} < b.$$

Und für die AUD/VIS-Bedingung:

$$(V) \quad \frac{|s - (0.92 \, t - f)|}{0.92 \, t - f} < b.$$

Durch Auflösen der inneren Klammer vereinfachen sich die Terme. Für die VIS/AUD-Bedingung:

$$(VI) \quad \frac{|s - 1/0.92 t + f|}{1/0.92 t - f} < b.$$

Für die AUD/VIS-Bedingung:

$$(VII) \quad \frac{|s - 0.92 t + f|}{0.92 t - f} < b.$$

Obige Formeln enthalten bei gegebenem s und gegebenem t die beiden Unbekannten b und f . b kann indes vernachlässigt werden, da dessen Betrag für die Bestimmung von f keine Rolle spielt. Es wird stattdessen angenommen, daß je kleiner der Quotient ist, desto größer die Wahrscheinlichkeit ist, daß b unterschritten und eine „Gleich“-Antwort evoziert wird. Mit anderen Worten: *Das Maximum von „Gleich“-Antworten soll bei Darbietung desjenigen Zeitintervalls auftreten, bei dem der Betrag des Quotienten im Vergleich zu dem bei anderen Zeitintervallen am relativ geringsten ist.*

Der aufmerksame Leser wird bemerkt haben, daß die Modellierung von Zeitschätzungen ohne Berücksichtigung von Varianzen auf den unterschiedlichen Ebenen der Zeitverarbeitung (Schrittmacher, Akkumulator, Gedächtnis und Entscheidungskriterium) zwangsläufig unvollständig ist und den tatsächlichen Prozeß ungenau abbildet. In der Tat kann z. B. auch dann für die Gleichheit zweier – unterschiedlicher – Zeitintervalle entschieden werden, wenn zwar der Wert des Quotienten relativ groß, der Wert des Kriteriums b hingegen aufgrund von zufälligen Schwankungen ebenfalls relativ groß ist. Unsere Überlegungen sollen daher unter Vernachlässigung dieser zufälligen Schwankungen Aussagen über *durchschnittlich* zu erwartendes Verhalten treffen und keinesfalls eine präzise Angabe über konkretes Verhalten in konkreten Situationen machen. Die hier angeführten Modellierungen stellen daher nur Näherungen dar und sollen helfen, unter Absehung von variablen Größen die *Invarianzen* in der Zeitschätzung zu verdeutlichen.

Für eine vorläufige grobe Abschätzung des Betrags von f wurden sieben willkürlich gewählte Werte für f in die Formeln (VI) und (VII) eingesetzt und der jeweilige numerische

Wert bestimmt. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse, die bei Gültigkeit der Formeln (VI) und (VII) für die Experimente 1 und 2 zu erwarten gewesen wären.

Tabelle 11. Willkürliche Werte für f und damit korrespondierende Werte für den Entscheidungsquotienten für die Experimente 1 und 2.

		Werte für f in Millisekunden (ms)							
		Vergleichsdauer (ms)	50	60	70	80	90	100	110
Bedingung VIS/AUD	300		0.449	0.503	0.562	0.625	0.694	0.796	0.851
	350		0.211	0.248	0.289	0.331	0.377	0.426	0.479
	400		0.040	0.067	0.097	0.127	0.160	0.195	0.232
	450		0.089	0.068	0.046	0.022	0.002	0.029	0.055
	500		0.189	0.173	0.155	0.137	0.118	0.098	0.077
	600		0.336	0.325	0.313	0.301	0.288	0.276	0.262
Bedingung AUD/VIS	300		0.770	0.852	0.942	1.041	1.151	1.270	1.410
	350		0.471	0.527	0.587	0.653	0.724	0.802	0.887
	400		0.258	0.299	0.342	0.389	0.439	0.490	0.550
	450		0.099	0.130	0.163	0.198	0.235	0.274	0.316
	500		0.024	0.000	0.026	0.034	0.081	0.111	0.143
	600		0.203	0.187	0.170	0.153	0.134	0.115	0.095

Anmerkung. Die fettgedruckten Werte des Quotienten sind die relativen Minima bezogen auf den jeweiligen Wert für f . Die kursiven Werte des Quotienten beziehen sich auf die entsprechenden Vergleichsintervalle in Experiment 2. Die graue Hinterlegung markiert den Bereich von f -Werten, innerhalb dessen für beide Bedingungen sowohl in Experiment 1 als auch in Experiment 2 eine Übereinstimmung mit den empirischen Modalwerten besteht.

Dem Augenschein nach liegt der Betrag des Fehlers zwischen $f_{\text{unten}} = 80$ ms und $f_{\text{oben}} = 110$ ms. Es zeigt sich ferner, daß ein additiver Fehler in diesem Bereich sowohl die Modalwerte der crossmodalen Bedingungen von Experiment 1 als auch die von Experiment 2 erklären könnte.

Zur genauen Bestimmung der *unteren* Grenze des Fehlers (f_u) wird auf die Modelldaten von Bedingung VIS/AUD aus Experiment 1 zurückgegriffen, da aufgrund der unterschiedlichen Uhrgeschwindigkeiten eine Verschiebung des Modalwerts (und damit des Minimums des Quotientens) in der VIS/AUD-Bedingung bei größeren Werten für f als in der AUD/VIS-Bedingung zu erwarten ist. f_u soll nach folgender Ungleichung bestimmt werden:

$$\frac{|400 - 1/0.92 \cdot 400 + f_u|}{1/0.92 \cdot 400 - f_u} < \frac{|400 - 1/0.92 \cdot 500 + f_u|}{1/0.92 \cdot 500 - f_u}.$$

Dies entspricht der Forderung, daß der Quotient bei Darbietung der 400 ms-Standarddauer kleiner sein soll als bei Darbietung der 500 ms-Vergleichsdauer. Es soll berechnet werden, bis zu welchem Wert diese Ungleichung Gültigkeit besitzt. Oder anders ausgedrückt: Wie groß muß f_u mindestens sein, damit der Modalwert bei 500 ms liegt? Dieser Grenzwert entspricht der unteren Grenze des Fehlers.

Durch Umformen erhält man:

$$\frac{|f_u - 34.7826|}{434.7826 - f_u} < \frac{|f_u - 143.4783|}{543.4783 - f_u}.$$

Multiplikation mit den jeweiligen Nennern führt zu:

$$(543.4783 - f_u) (|f_u - 34.7826|) < (434.7826 - f_u) (|f_u - 143.4783|).$$

Durch Quadrierung werden die absoluten Beträge eliminiert:

$$(543.4783 - f_u)^2 (f_u - 34.7826)^2 < (434.7826 - f_u)^2 (f_u - 143.4783)^2.$$

Durch Auflösung der Binome ergibt sich:

$$(295368.62 - 1086.9565f_u + f_u^2) (f_u^2 - 69.5652f_u + 1209.8299)$$

<

$$(191653.6125 - 875.5652f_u + f_u^2) (f_u^2 - 286.9565f_u + 20586.0113).$$

Schließlich erhält man:

$$0 < f_u^2 - 560.3560f_u + 39301.1673.$$

Gesucht wird der Grenzwert, ab dem diese Ungleichung nicht mehr gilt. Dies ist der Fall, wenn sie zur Gleichung wird. Setzt man $f_u^2 - 572f_u + 38880$ gleich Null, erhält man die Normalform einer quadratischen Gleichung:

$$(VIII) \quad f_u^2 + pf_u + q = 0.$$

Durch Lösung dieser Gleichung ergeben sich die beiden Quadratwurzeln f_{u1} und f_{u2} . Sie definieren die (theoretischen) Grenzwerte des Fehlers. f_{u1} und f_{u2} lassen sich nach folgenden Formeln bestimmen:

$$(IX) \quad f_{u1} = -p/2 + \sqrt{((p/2)^2 - q)},$$

$$(X) \quad f_{u2} = -p/2 - \sqrt{((p/2)^2 - q)}.$$

Die Anwendung der Lösungsformeln ergibt:

$$f_{u1} = 478.15,$$

$$f_{u2} = 82.2059.$$

Der Wert für f_{u2} stellt den unteren Grenzwert des Fehlers dar, f_{u1} entspricht dem oberen Grenzwert. Bei Betrachtung von Tabelle 11 fällt jedoch sofort auf, daß f_{u1} nicht mit den empirischen Daten aus Bedingung AUD/VIS von Experiment 1 übereinstimmt. Der Grund liegt in den unterschiedlichen Werten für t im Quotienten der Bedingung AUD/VIS verglichen mit Bedingung VIS/AUD. Somit muß der obere Grenzwert des Fehlers (f_o) unter Rückgriff auf die Modelldaten aus Tabelle 11 der Bedingung AUD/VIS bestimmt werden.

f_o wird nach folgender Ungleichung berechnet:

$$\frac{|400 - 0.92 \cdot 500 + f_o|}{0.92 \cdot 500 - f_o} < \frac{|400 - 0.92 \cdot 600 + f_o|}{0.92 \cdot 600 - f_o}.$$

Dies entspricht der Forderung, daß der Quotient bei Darbietung der 500 ms-Vergleichsdauer kleiner sein soll als bei Darbietung der 600 ms-Vergleichsdauer. Gesucht wird derjenige Wert, den der Fehler maximal annehmen kann, damit der Modalwert noch bei 500 ms auftritt. Dieser Wert entspricht damit der *oberen* Grenze des Fehlers.

Es ergeben sich:

$$f_{o1} = 511.2218312$$

$$f_{o2} = 100.7781688$$

Für die Bestimmung des Fehlers ist nur f_{o2} relevant. Dieser Wert kann als die obere Grenze des Fehlers angesehen werden. *Daraus folgt insgesamt, daß der Wert des Fehlers rechnerisch zwischen 82.2 ms und 100.7 ms liegt.*

Bestimmung der Fehlergröße unter der *Proportionalitätshypothese*

Wird davon ausgegangen, daß der Fehler *per multiplicationem* die wahrgenommene Dauer t verringert, so ergeben sich für das Entscheidungsverhalten folgende formale Darstellungen.

Für die VIS/AUD-Bedingung:

$$(XI) \quad \frac{|s - (1/0.92 \, t \cdot F)|}{1/0.92 \, t \cdot F} < b.$$

Und für die AUD/VIS-Bedingung:

$$(XII) \quad \frac{|s - (0.92 \, t \cdot F)|}{0.92 \, t \cdot F} < b.$$

Damit ein Vergleichsintervall von 500 ms als Standarddauer (400 ms) beurteilt werden kann (wie in Experiment 1 geschehen), müßte das Vergleichsintervall um den Faktor 0.8 unterschätzt worden sein. Wir nehmen diesen Wert zunächst als Orientierungsgröße. Um einen Überblick über mögliche Häufigkeitsverteilungen von abgegebenen „Gleich“-Antworten zu erhalten, sind in Tabelle 12 – wie zuvor schon unter der Annahme der Additivität des Fehlers – willkürliche Werte für F (hier interpretiert als *Faktor*) und mit diesen korrespondierende Werte des Entscheidungsquotienten angegeben.

Tabelle 12. Willkürliche Werte für F und damit korrespondierende Werte für den Entscheidungsquotienten für die Experimente 1 und 2 bei Annahme der Proportionalität des Fehlers.

		Werte für F		
Vergleichsdauer (ms)		0.7	0.8	0.9
Bedingung VIS/AUD	300	0.752	0.533	0.363
	350	0.502	0.314	0.168
	400	0.314	0.150	0.022
	450	0.168	0.022	0.091
	500	0.051	0.080	0.182
	600	0.124	0.233	0.319
Bedingung AUD/VIS	300	1.070	0.812	0.610
	350	0.775	0.553	0.380
	400	0.553	0.359	0.208
	450	0.380	0.208	0.074
	500	0.242	0.087	0.034
	600	0.035	0.094	0.195

Anmerkung. Die fettgedruckten Werte des Quotienten sind die relativen Minima bezogen auf den jeweiligen Wert für F . Die kursiven Werte des Quotienten beziehen sich auf die entsprechenden Vergleichsintervalle in Experiment 2. Die graue Hinterlegung markiert den Bereich von F -Werten, innerhalb dessen für beide Bedingungen sowohl in Experiment 1 als auch in Experiment 2 eine Übereinstimmung mit den empirischen Modalwerten besteht.

Im Unterschied zur Annahme eines additiven Fehlers, bei der eine Vergrößerung des theoretischen Fehlerwertes eine Verschiebung des Modalwerts in Richtung eines größeren Vergleichsintervalls zur Folge hat, ist es mit dem proportionalen Fehler gerade umgekehrt. Der Quotient ist am niedrigsten, wenn $F \cdot t$ gegen s geht. Wächst F , muß t entsprechend kleiner werden, damit $F \cdot t = \text{const.}$ Folglich verschiebt sich der Modalwert in Richtung eines kleineren Vergleichsintervalls, je größer F ist. Daher muß zur mathematischen Bestimmung der oberen Grenze des Fehlers auf die Forderung zurückgegriffen werden, daß

$$\frac{|400 - 1/0.92 \cdot 400 \cdot F_0|}{1/0.92 \cdot 400 \cdot F_0} < \frac{|400 - 1/0.92 \cdot 500 \cdot F_0|}{1/0.92 \cdot 500 \cdot F_0}.$$

Das bedeutet, daß der Quotient bei Darbietung der 400 ms-Standarddauer kleiner sein soll als bei Darbietung der 500 ms-Vergleichsdauer. Es soll somit ermittelt werden, wie groß F_0 höchstens sein darf, damit der Modalwert noch bei 400 ms liegt.¹³

Durch Umwandlung der Ungleichung in eine Gleichung und Auflösung nach F_0 erhält man für den oberen Grenzwert:

$$F_0 = 0.828.$$

Zur Bestimmung der *unteren* Grenze wird aufgrund der unterschiedlichen Modelldaten zwischen den Bedingungen auf die Daten der Bedingung AUD/VIS zurückgegriffen. Es wird derjenige Grenzwert gesucht, mit dem

$$\frac{|400 - 0.92 \cdot 500 \cdot F_u|}{0.92 \cdot 500 \cdot F_u} < \frac{|400 - 0.92 \cdot 600 \cdot F_u|}{0.92 \cdot 600 \cdot F_u}.$$

zu einer Gleichung wird.

Der gesuchte untere Grenzwert lautet:

$$F_u = 0.797101449.$$

Damit befinden sich die möglichen Faktoren näherungsweise zwischen $F_u = 0.80$ und $F_0 = 0.82$.

Empirische Entscheidung über die konkurrierenden Modelle

(*additiver* versus *proportionaler* Fehler)

Mit den zwei folgenden Experimenten soll nun die Hypothese eines *additiven* Fehlers mit der Hypothese eines *proportionalen* Fehlers kontrastiert werden. Zu diesem Zweck wurde gegenüber den vorangegangenen Experimenten die Standarddauer variiert. In Experiment 4 war die Standarddauer 200 ms, in Experiment 5 1200 ms. Die Wahl dieser beiden

¹³ Wie sich leicht nachprüfen läßt, liegt der so ermittelte Grenzwert auch innerhalb der Werte der Quotienten von Experiment 2.

Standarddauern rekurriert auf folgenden Umstand: In den crossmodalen Bedingungen von Experiment 4 sollte ein relativ kleiner Effekt zu Lasten differentieller Uhrgeschwindigkeiten entstehen, da diese proportional mit der Dauer anwächst. Eine Verschiebung der Gradienten nach rechts wäre also fast ausschließlich auf den gedächtnisbedingten Modalitätswechseleffekt zurückzuführen. Im Unterschied zu Experiment 4 wird für Experiment 5 ein verhältnismäßig großer Effekt der unterschiedlichen Uhrgeschwindigkeiten erwartet. Sollte der modalitätsbedingte Gedächtniseffekt hier nachgewiesen werden können, sollte sich in der VIS/AUD-Bedingung eine schwächere rechtsseitige Verschiebung als in der AUD/VIS-Bedingung vorfinden lassen. Darüberhinaus produzieren die konkurrierenden Annahmen bzgl. Additivität versus Proportionalität des Gedächtniseffektes unterschiedliche zu erwartende Modalwerte der Gradienten in beiden Experimenten.

Experiment 4

Ableitung von psychologischen Hypothesen
und Aufstellung testbarer statistischer Hypothesen

Ableitung der psychologischen Hypothesen (PHn)

Mit Experiment 4 sollen zwei Hypothesen geprüft werden.

PH 4-1: Es soll geprüft werden, ob sich der in Experiment 1 und 2 gefundene Effekt der Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle innerhalb der crossmodalen Bedingungen replizieren läßt.

PH 4-2: Ferner soll geprüft werden, ob dieser Effekt zutreffend als entweder additiv oder proportional charakterisiert werden kann.

Aufstellen der statistischen Hypothesen (SHn)

Aus den psychologischen Hypothesen leiten sich folgende statistische Hypothesen ab:

Kasten 12.

Von der *PH 4-1* zur *SH 4-1*.

PH 4-1: In beiden crossmodalen Bedingungen sollten dargebotene Zeitintervalle systematisch unterschätzt werden.

SH 4-1: Wenn innerhalb der crossmodalen Bedingungen eine Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle stattgefunden hat, dann sollten beide Gradienten wegen des geringen zu erwartenden Uhreffekts insgesamt im Vergleich mit den Gradienten der unimodalen Bedingungen nach rechts verschoben sein. Opera-

tionalisiert man das Ausmaß der Unterschätzung als Differenz zwischen der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen größer als die Standarddauer und der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen kleiner als die Standarddauer, so sollte diese Differenz in den cross-modalen Bedingungen größer sein als in den unimodalen Bedingungen.

Formal ausgedrückt:

$$M_{\text{DIFF}}(\text{AUD}/\text{VIS} + \text{VIS}/\text{AUD}) > M_{\text{DIFF}}(\text{AUD}/\text{AUD} + \text{VIS}/\text{VIS}).$$

Kasten 13.

Von der PH 4-2 zur SH 4-2.

PH 4-2: Es soll geprüft werden, ob ein möglicher Unterschätzungseffekt additiv oder proportional ist.

SH 4-2: Um die Gradienten dieses Experiments im Hinblick auf einen additiven versus proportionalen Fehler beurteilen zu können, muß dasjenige Vergleichsintervall antizipiert werden können, an dem ein Verhaltensmaximum erwartet wird. Setzt man die für Experiment 1 und Experiment 2 ermittelten Schätzgrößen des Fehlers als gegeben voraus, erhält man für Experiment 4 die in Tabelle 13 angegebenen erwarteten Werte des Quotienten. Aus diesen läßt sich auf die zu erwartenden Modalwerte der Gradienten schließen: Da die berechneten Werte die Wahrscheinlichkeit reflektieren, mit der die Versuchspersonen ein Vergleichsintervall als Standarddauer identifizieren, entspricht dasjenige Vergleichsintervall, bei dem der erwartete Wert am geringsten ist, dem Modalwert des Gradienten.

Tabelle 13. Erwartete Werte des Entscheidungsquotienten für Experiment 4 unter Annahme der Additivität bzw. Proportionalität des Schätzfehlers.

		additiv		proportional	
		$f(ms)$		F	
	Vergleichsdauer (ms)	82.3	100.7	0.80	0.83
Bedingung VIS/AUD	150	1.477	2.208	0.543	0.487
	200	0.480	0.714	0.157	0.116
	250	0.056	0.169	0.074	0.108
	300	0.180	0.113	0.228	0.256
	350	0.329	0.285	0.339	0.363
Bedingung AUD/VIS	150	2.291	4.362	0.816	0.746
	200	0.967	1.401	0.359	0.310
	250	0.354	0.547	0.087	0.048
	300	0.033	0.141	0.094	0.127
	350	0.166	0.096	0.224	0.252

Anmerkung. Die kleinsten Werte sind fettgedruckt und weisen auf den jeweiligen Modalwert hin.

Die SH 4-2 läßt sich in zwei Subhypothesen aufteilen.

SH 4-2a: Aus Tabelle 13 ergibt sich, daß der erwartete Modalwert in der Bedingung VIS/AUD sowohl unter Annahme der Additivität als auch unter Annahme der Proportionalität bei 250 ms liegen kann. Für die Bedingung AUD/VIS hingegen differieren die erwarteten Unterschiede deutlicher zwischen den beiden Annahmen: bei einem additiven Fehler sollte der Modalwert bei 300 ms bzw. 350 ms liegen, wohingegen bei einem proportionalen Fehler der Modalwert wie in Bedingung VIS/AUD bei 250 ms liegen sollte.

SH 4-2b: Ein Verschiebung beider crossmodaler Gradienten gegeneinander würde damit eher auf einen additiven Fehler hindeuten. Aufgrund der unter-

schiedlichen prognostizierten Modalwerte zwischen der VIS/AUD- und der AUD/VIS-Bedingung unter der Hypothese eines additiven Fehlers wird erwartet, daß die rechtsseitige Verschiebung des Gradienten der AUD/VIS-Bedingung größer ist als die des Gradienten der VIS/AUD-Bedingung. Folglich soll die Differenz zwischen der Häufigkeit positiver Antworten bei Intervallen größer als die Standarddauer und der Häufigkeit positiver Antworten kleiner als die Standarddauer in der AUD/VIS-Bedingung größer sein als in der VIS/AUD-Bedingung.

Formal lautet die Hypothese wie folgt:

$$M_{\text{DIFF}}(\text{AUD/VIS}) > M_{\text{DIFF}}(\text{VIS/AUD}).$$

Methode

Versuchspersonen

20 Personen nahmen an der Untersuchung teil und wurden auf vier gleich große Gruppen randomisiert. Das Durchschnittsalter der Versuchsteilnehmer betrug 24.2 Jahre ($SD = 3.54$, Range: 19 bis 32 Jahre). 70% waren Frauen, 30 % waren Männer. Jede Versuchsperson erhielt für die Teilnahme DM 10.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Die zu lernende Standarddauer war 200 ms. Die Anzahl der Nichtstandard-Vergleichsreize betrug sechs. Insgesamt wurden folgende Intervalle dargeboten: 50 ms, 100 ms, 150 ms, 200 ms, 250 ms, 300 ms und 350 ms.

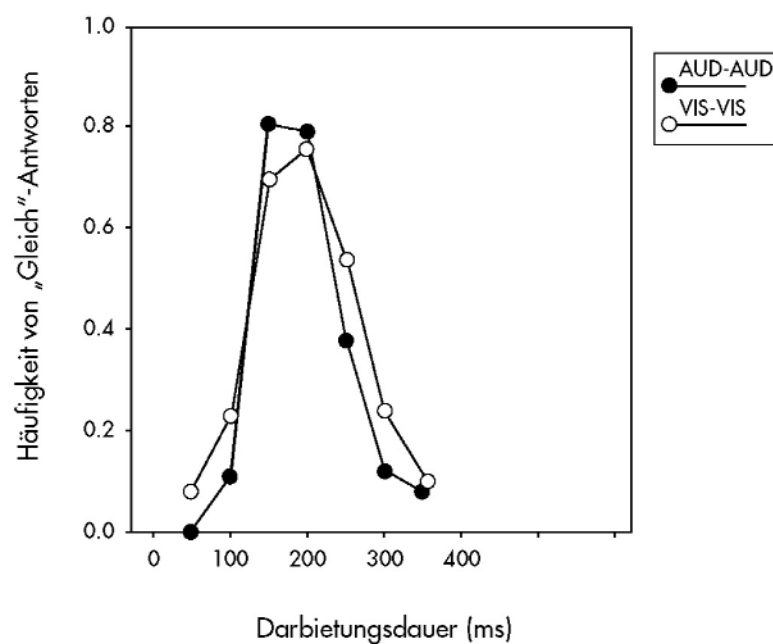
Instruktion und Versuchsablauf

Instruktionen und Versuchsablauf stimmten mit denen von Experiment 1 und 2 weitgehend überein. Während der Trainingsphase wurden den Versuchspersonen zwei Blöcke (mit insgesamt 20 Versuchsdurchgängen) dargeboten. Die Testphase bestand aus 20 Blöcken resp. 200 Versuchsdurchgängen.

Die mittlere Dauer des Experiments betrug 32 Minuten ($SD = 4.89$).

Ergebnisse

Abbildung 18 (S. 154f.) zeigt die mittleren relativen Häufigkeiten positiver Antworten in Abhängigkeit von der dargebotenen Dauer der vier untersuchten Gruppen in der Testphase.



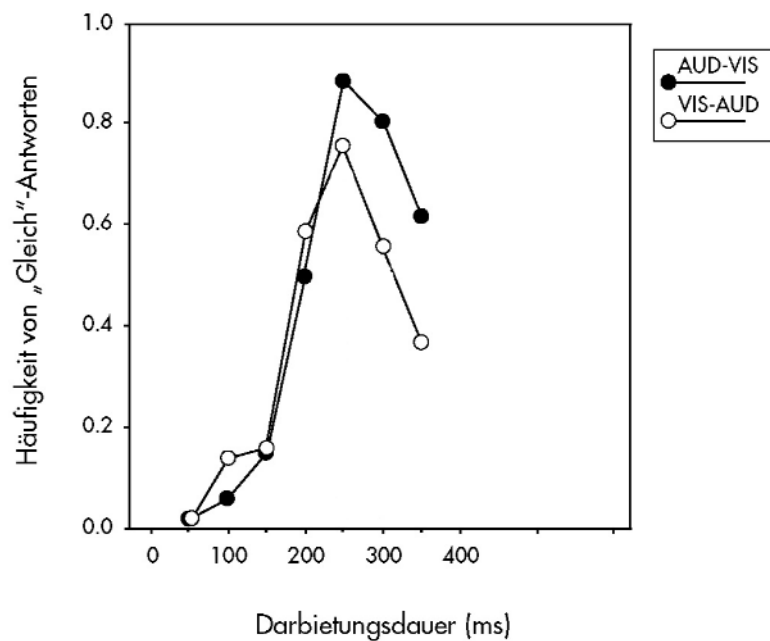


Abbildung 18. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 4. S. 154: Gradienten der unimodalen Bedingungen. S. 155: Gradienten der crossmodalen Bedingungen.

Während der Gradient der rein visuellen Bedingung (VIS/VIS) bei Darbietung der Standarddauer sein Maximum hat, liegt der Modalwert der rein auditiven Bedingung bereits bei Darbietung des nächst kürzeren Intervalls (150 ms). Hingegen finden sich in beiden crossmodalen Bedingungen (AUD/VIS und VIS/AUD) Verschiebungen der Gradienten nach rechts. Der Modalwert beider Gradienten liegt bei Darbietung des 250 ms-Vergleichsintervalls.

Prüfung der SH 4-1 und der SH 4-2b

Zur Prüfung von Unterschieden in der Unterschätzung dargebotener Intervalle zwischen crossmodalen und unimodalen Bedingungen (SH 4-1) und zwischen den beiden crossmodalen Bedingungen (SH 4-2b) wurden zwei orthogonale Einzelvergleiche zu einem Kontrast zusammengefaßt und mittels t-Test für unabhängige Stichproben mit der Differenz zwischen der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen größer als die Standarddauer und der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen klei-

ner als die Standarddauer als abhängige Variable getestet. Da über dieselbe abhängige Variable zweimal getestet wurde, muß wegen der α -Fehler-Kumulierung (vgl. Bortz, 1993, S. 248 f.) die Irrtumswahrscheinlichkeit korrigiert werden. Die Korrektur erfolgt nach Bonferroni über $\alpha_{\text{kor}} = \alpha/m = .025$, mit $m = \text{Anzahl der Tests} = 2$. Tabelle 14 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Versuchsgruppen.

Tabelle 14. Mittelwerte und Standardabweichungen über die Differenz zwischen der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen größer als die Standarddauer und der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen kleiner als die Standarddauer.

<i>Bedingung</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
AUD/AUD	-0.34	0.3417
VIS/VIS	-0.13	0.7413
AUD/VIS	2.11	0.2903
VIS/AUD	1.36	0.6025

Einzelvergleich D_1 besteht aus der Differenz der Mittelwerte zwischen den unimodalen und den crossmodalen Bedingungen (SH 4-1):

$$D_1 = 1/2 (M_{\text{AUD/VIS}} + M_{\text{VIS/AUD}}) - 1/2 (M_{\text{AUD/AUD}} + M_{\text{VIS/VIS}}).$$

Der entsprechende t-Wert lautet: $t(16) = -8.349$, $p < .0001$. Der empirische Effekt beträgt $d_{\text{emp}} = 3.99$. Damit kann die SH 4-1 angenommen werden.

Einzelvergleich D_2 ergibt sich aus der Differenz der Mittelwerte zwischen den beiden crossmodalen Bedingungen (SH 4-2b):

$$D_2 = M_{\text{AUD/VIS}} - M_{\text{VIS/AUD}}.$$

Der zugehörige t-Wert lautet: $t(16) = 2.248$, $p = .0195$; $d_{\text{emp}} = 1.68$. Somit kann auch die SH 4-2b angenommen werden.

Prüfung der SH 4-2a

Die Bewertung der SH 4-2a setzt den Vergleich zwischen antizipierten und empirischen Modalwerten voraus. Tabelle 15 faßt die entsprechenden Modalwerte zusammen.

Tabelle 15. Erwartete und empirische Modalwerte in Experiment 4.

Bedingung								
AUD/AUD			VIS/VIS		AUD/VIS		VIS/AUD	
Angenommenes Modell								
	Additiv	Proport.	Additiv	Proport.	Additiv	Proport.	Additiv	Proport.
Erwartet	200	200	200	200	300/350	250	250/300	250
Empirisch	150		200		250		250	

Der Modalwert der rein auditiven Bedingung (AUD/AUD) stimmt nicht mit dem erwarteten überein, während es in der rein visuellen Bedingung (VIS/VIS) zu einer Übereinstimmung kommt. In den crossmodalen Bedingungen entsprechen die empirischen Modalwerte den vorhergesagten unter der Annahme der Proportionalität des Fehlers.

Diskussion

Die Ergebnisse von Experiment 4 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Erstens konnte der Befund aus den crossmodalen Bedingungen der Experimente 1 und 2 mit einer kürzeren Standarddauer (200 ms) repliziert werden. Die Diskriminationsleistung in der Testphase veränderte sich, wenn die Modalitäten von Trainings- und Testphase verschieden statt gleich waren. Die Veränderung ist darauf zurückzuführen, daß in beiden crossmodalen Bedingungen dargebotene Zeitintervalle stärker unterschätzt wurden als in den unimodalen Bedingungen. Intervalle größer als die Standarddauer wurden häufiger als Standarddauer identifiziert als Intervalle, die kleiner als die Standarddauer waren. Die Modalwerte beider crossmodalen Bedingungen lagen rechts von der Standarddauer bei 250 ms. Damit hat sich die *PH 4-1* bewährt.

Zweitens liefern die Daten – allerdings zum Teil widersprüchliche – Hinweise auf die Eigenschaft des systematischen Fehlers in der Beurteilung von Zeitintervallen innerhalb der

crossmodalen Bedingungen. Der Vergleich der erwarteten Modalwerte mit den empirischen deutet auf eine Bestätigung der Hypothese des proportionalen Fehlers hin. Bekräftigung erfährt diese Hypothese durch die Betrachtung der Verteilung positiver Antworten bei den übrigen Stimulusdauern allerdings nicht. Im Gegenteil, hinsichtlich des Ausmaßes der Unterschätzung dargebotener Intervalle zeigt sich ein Unterschied zwischen der AUD/VIS- und der VIS/AUD-Bedingung (das Ausmaß der Unterschätzung ist in der AUD/VIS-Bedingung größer als in der VIS/AUD-Bedingung). Dieser Unterschied zwischen den crossmodalen Bedingungen ist mit der Hypothese der Proportionalität des Fehlers nicht zu vereinbaren und spricht deshalb für die Additivitäts-Hypothese (vgl. *SH 4-2b*).

Auffallend ist im übrigen, daß selbst in einer der unimodalen Bedingungen (AUD/AUD) der Modalwert nicht bei der Standarddauer, sondern bei der nächst kürzeren Vergleichsdauer (150 ms) anzutreffen ist. Möglicherweise ist dies dem Umstand geschuldet, daß Beurteilungen sehr kurzer Intervalle in einem stärkeren Maße von Faktoren wie z. B. der sensorischen Stimulation abhängig sind als Beurteilungen längerer Intervalle (vgl. Wearden & Bray, 2001).

Zusammengenommen kann aufgrund des Widerspruchs in den Daten die Frage nach der zutreffenden Charakterisierung des Schätzfehlers als entweder additiv oder proportional nicht entschieden werden. Näherer Aufschluß wurde daher durch die Ergebnisse eines weiteren Experiments erwartet, in welchem die Standarddauer auf 1200 ms heraufgesetzt wurde.

Experiment 5

Ableitung von psychologischen Hypothesen
und Aufstellung testbarer statistischer Hypothesen

Ableitung der psychologischen Hypothese (PH)

Folgende Hypothese wurde mit Experiment 5 geprüft:

PH 5: Die Hypothese, daß der in den Experimenten 1, 2 und 4 gefundene Unterschätzungseffekt tatsächlich eher auf einen proportionalen Schätzfehler zurückzuführen ist, wie dies durch die Modalwerte in Experiment 4 nahegelegt wird, soll mit diesem Experiment geprüft werden.

Aufstellen der statistischen Hypothesen (SHn)

Aus der psychologischen Hypothese leiten sich folgende statistische Hypothesen ab:

Kasten 14.

Von der *PH 5* zur *SH 5*.

PH 5: Der Schätzfehler ist proportional.

SH 5a: Tabelle 16 zeigt die für die crossmodalen Bedingungen von Experiment 5 erwarteten Werte des Entscheidungsquotienten und die damit korrespondierenden Modalwerte der Generalisationsgradienten.

Tabelle 16. Erwartete Werte des Entscheidungsquotienten für Experiment 5 unter der Annahme der Additivität bzw. Proportionalität des Schätzfehlers.

	additiv		proportional	
	$f(ms)$		F	
Vergleichsdauer (ms)	82.3	100.7	0.80	0.83
Bedingung VIS/AUD	1100	0.078 0.096	0.263	0.217
	1200	0.016 0.003	0.157	0.116
	1300	0.098 0.086	0.069	0.030
	1400	0.166 0.156	0.008	0.044
	1500	0.225 0.216	0.074	0.108
Bedingung AUD/VIS	1100	0.291 0.317	0.482	0.429
	1200	0.146 0.196	0.359	0.310
	1300	0.077 0.095	0.254	0.209
	1400	0.005 0.011	0.165	0.123
	1500	0.075 0.062	0.087	0.048

Anmerkung. Die kleinsten Werte sind fettgedruckt und weisen auf den jeweiligen Modalwert hin.

Es zeigt sich, daß der erwartete Modalwert in der Bedingung VIS/AUD unter Annahme der Additivität bei 1200 ms liegt, unter der Annahme der Proportionalität hingegen bei 1300 ms bzw. 1400 ms (je nach Größe des Faktors F) liegt. In der Bedingung AUD/VIS differieren die erwarteten Modalwerte ebenfalls in Abhängigkeit von der zugrundegelegten Fehlerannahme: bei einem additiven Fehler sollte der Modalwert bei 1400 ms liegen, bei einem proportionalen Fehler hingegen bei 1500 ms.

SH 5b: Basierend auf den prognostizierten Modalwerten sollte unter der Hypothese eines additiven Fehlers nur in der AUD/VIS-Bedingung eine Verschie-

bung des Gradienten nach rechts vorzufinden sein, wohingegen alle anderen Gradienten sich weitgehend symmetrisch um die Standarddauer verteilen sollten. Unter der Annahme eines proportionalen Fehlers sollte dagegen auch der Gradient der VIS/AUD-Bedingung nach rechts verschoben sein. Folglich sollten bei einem proportionalen Fehler in der Bedingung VIS/AUD mehr positive Antworten bei Intervallen größer als die Standarddauer im Vergleich zur Häufigkeit positiver Antworten bei Intervallen kleiner als die Standarddauer erfolgen als in den beiden unimodalen Bedingungen (AUD/AUD und VIS/VIS):

$$M_{\text{DIFF}}(\text{VIS/AUD}) > M_{\text{DIFF}}(\text{AUD/AUD} + \text{VIS/VIS}).$$

Methode

Versuchspersonen

20 Versuchspersonen wurden vier gleich großen Gruppen zufällig zugeteilt. Das Durchschnittsalter der Versuchsteilnehmer betrug 23.85 Jahre ($SD = 2.46$; Range: 19-29). 80% waren Frauen, 20% waren Männer. Jede Versuchsperson erhielt für die Teilnahme DM 15 bzw. 7,50 Euro.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Die Standarddauer war 1200 ms. Die Anzahl der Nichtstandard-Vergleichsreize betrug sechs. Insgesamt ergaben sich folgende Intervalle: 900 ms, 1000 ms, 1100 ms, 1200 ms, 1300 ms, 1400 ms und 1500 ms.

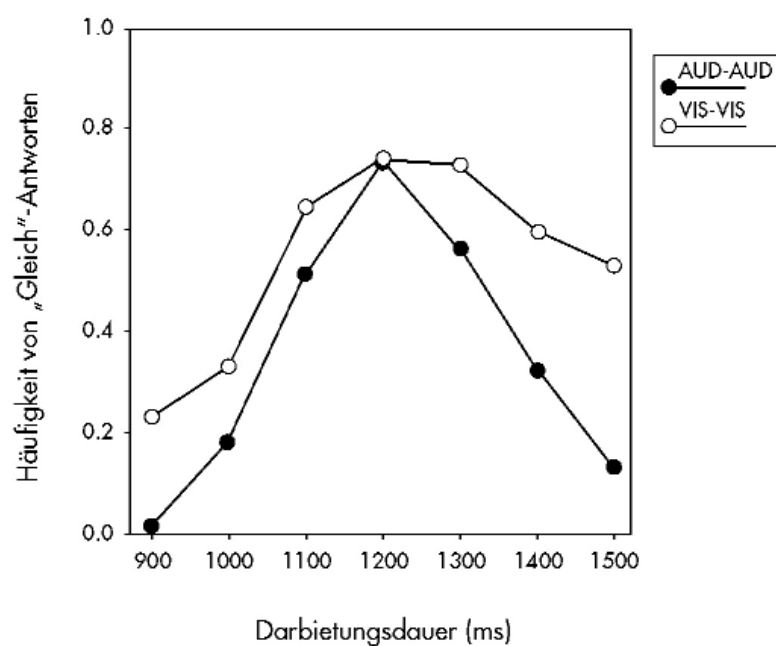
Instruktion und Versuchsablauf

Instruktionen und Versuchsablauf stimmten mit denen von Experiment 1, 2 und 4 weitgehend überein. Die Darbietung der Stimuli erfolgte in Blöcken, innerhalb derer die Reihenfolge der Stimulusdarbietung randomisiert war. Ein Block bestand aus 10 Versuchsdurchgängen, die Standarddauer wurde innerhalb eines Blocks viermal präsentiert, jede Nichtstandard-Vergleichsdauer innerhalb desselben Blocks einmal. Während der Trainingsphase wurde den Versuchspersonen zwei Blöcke (insgesamt 20 Versuchsdurchgänge) angeboten. Die Testphase bestand aus 20 Blöcken resp. 200 Versuchsdurchgängen.

Die mittlere Gesamtdauer des Experiments betrug 40.75 Minuten ($SD = 6.54$).

Ergebnisse

Abbildung 19 (S. 162f.) zeigt die mittleren relativen Häufigkeiten positiver Antworten in Abhängigkeit von der dargebotenen Dauer der vier untersuchten Gruppen in der Testphase.



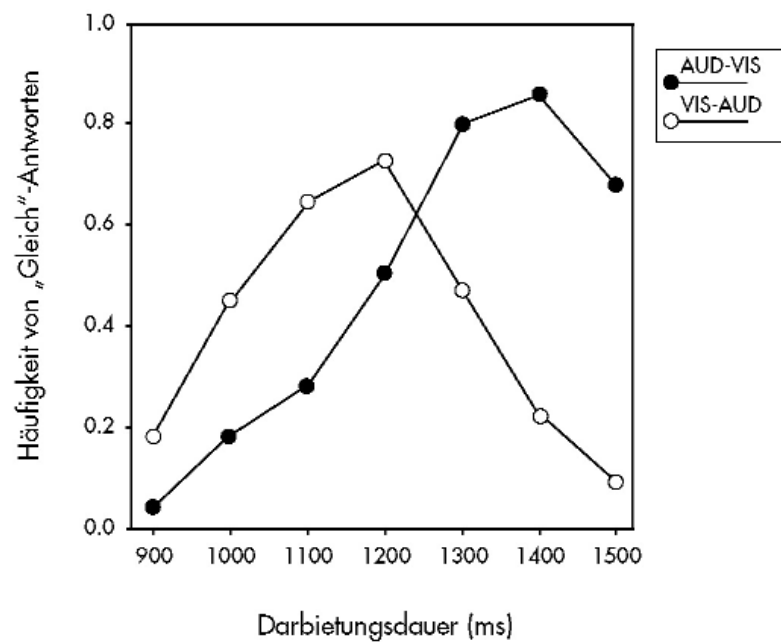


Abbildung 19. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 5. S. 162: Gradienten der unimodalen Bedingungen. S. 163: Gradienten der crossmodalen Bedingungen.

Beide Gradienten der unimodalen Bedingungen (AUD/AUD und VIS/VIS) erreichen ihr Maximum bei Darbietung der Standarddauer. Der Gradient der AUD/AUD-Bedingung ist steiler als der Gradient der VIS/VIS-Bedingung, was auf eine schlechtere Diskriminierbarkeit der visuellen Intervalle schließen läßt. In den crossmodalen Bedingungen zeigt sich, dass der Gradient der AUD/VIS-Gruppe stark nach rechts verschoben ist, während der Gradient der VIS/AUD-Bedingung sich etwas nach links neigt. Wie die Gradienten der unimodalen Bedingungen hat auch der VIS/AUD-Gradient den Modalwert bei Darbietung der Standarddauer.

Prüfung der SH 5a

Zur Beurteilung der SH 5a werden in Tabelle 17 erwartete und empirische Modalwerten gegenübergestellt.

Tabelle 17. Erwartete und empirische Modalwerte in Experiment 5.

Bedingung								
AUD/AUD			VIS/VIS		AUD/VIS		VIS/AUD	
Angenommenes Modell								
Additiv			Proport.		Additiv		Proport.	
Erwartet	1200	1200	1200	1200	1400	1500	1200	1300/1400
Empirisch	1200		1200		1400		1200	

Die empirischen Modalwerte der unimodalen Bedingungen fallen mit den erwarteten zusammen. Hingegen entsprechen in keiner der crossmodalen Bedingungen die empirischen Modalwerte den vorhergesagten, wenn dem Fehler Proportionalität unterstellt wird, sondern weisen stattdessen auf einen additiven Fehler hin. Somit muß die *SH 5a* unter Annahme eines proportionalen Fehlers abgelehnt werden.

Prüfung der *SH 5b*

Dieses Ergebnis wird durch die Prüfung der *SH 5b* bekräftigt. Eine Verschiebung des VIS/AUD-Gradienten nach rechts – wie es unter der Annahme der Proportionalität des Fehlers zu erwarten gewesen wäre – fand nicht statt. Tabelle 18 stellt die Unterschätzungswerte der einzelnen Bedingungen dar.

Tabelle 18. Mittelwerte und Standardabweichungen über die Differenz zwischen der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen größer als die Standarddauer und der Häufigkeit positiver Antworten bei Darbietung von Intervallen kleiner als die Standarddauer.

Bedingung	<i>M</i>	<i>SD</i>
AUD/AUD	0.25	0.7348
VIS/VIS	0.57	0.5563
AUD/VIS	1.84	0.4037
VIS/AUD	-0.50	0.3889

Im Gegenteil, der Gradient der VIS/AUD-Bedingung ist sogar etwas nach links verschoben. Der Unterschied zwischen der Verschiebung des Gradienten der VIS/AUD-Bedingung und der Verschiebung der Gradienten der unimodalen Bedingungen ist mit $t(16) = 3.08$, $p = .00035$, $d_{\text{emp}} = -1.625$, signifikant. Daher muß die *SH 5b* ebenfalls abgelehnt werden.

Diskussion

Wegen der Übereinstimmung der empirischen Modalwerte mit den erwarteten „Additivitäts“-Modalwerten und auf Grund der Ablehnung der *SH 5b* kann die psychologische Hypothese nicht weiter aufrechterhalten werden, daß der Unterschätzungseffekt durch einen proportionalen Fehler zustande gekommen ist. Statt einer Verschiebung des Gradienten der VIS/AUD-Bedingung nach rechts trat sogar ein gegenteiliger Effekt auf: der Gradient zeigte eine leichte Tendenz nach links, d. h. es wurden in dieser Bedingung Intervalle, die kleiner als die Standarddauer waren, häufiger mit dieser verwechselt als Intervalle, die größer als die Standarddauer waren. Als Begründung für diese „Linksneigung“ kann ins Feld geführt werden, daß bei den hier verwendeten Intervallen ein deutlich größerer Effekt zu Lasten der Schrittmacherfrequenz zu erwarten war als in den vorangegangenen Experimenten mit kürzeren Intervallen. Je größer nun der Einfluß der zwischen auditiv und visuell perzipierten Intervallen unterschiedlichen Schrittmacherfrequenz, desto eher ist damit zu rechnen, daß visuell dargebotene Intervalle, die mit einem akustischen Standard verglichen werden müssen, als kürzer als der Standard geschätzt werden.

Die Daten aus Experiment 5 können daher besser mit der Annahme einer Verursachung der Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle in den crossmodalen Bedingungen durch einen additiven Fehler statt durch einen proportionalen Fehler erklärt werden.

Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse aus den Experimenten 4 und 5 und inhaltliche Spezifizierung des theoretischen Modells zur Begründung des gefundenen Effekts

Der in den Experimenten 1 und 2 ermittelte Befund, daß die Beurteilung von Zeitintervallen im Hinblick auf einen im Gedächtnis repräsentierten Standard dann einem systematischen Fehler unterliegt, wenn die Stimulusdarbietung in einer Modalität erfolgt, die nicht mit der Modalität der vorangegangenen Lernphase übereinstimmt, konnte in den Experimenten 4 und 5 repliziert werden. Darüberhinaus konnte die Hypothese widerlegt werden, daß der empirische Schätzfehler auf einen proportionalen, mit der Stimulusdauer anwachsenden „Fehler“ in der Verarbeitung kurzer Zeitintervalle zurückgeht. Statt dessen sprechen die Befunde für eine additive, von der Stimulusdauer unabhängige Fehlergröße. Das Ausmaß der Unterschätzung liegt näherungsweise zwischen 80 ms und 100 ms. Diese berechnete Größe stellt allerdings zunächst eine *theoretische* Größe dar, die sich ebenso wie s und t in Zeiteinheiten angeben läßt und als Parameter für die Schätzung der Wahrscheinlichkeit fungiert, ein gegebenes Intervall mit der Standarddauer zu identifizieren. Sie sagt hingegen nichts darüber aus, in welcher Form dadurch ein realer kognitiver Prozeß widerspiegelt wird. Des weiteren bleibt vorerst unbekannt, ob der empirische Schätzfehler das Resultat der Verminderung von t oder der Vergrößerung von s darstellt. Im folgenden soll daher der Versuch unternommen werden, die möglichen Ursachen einzugrenzen, die einem solchen „Verarbeitungsfehler“ zugrundeliegen könnten.

Wie bereits festgestellt, beschreibt die Größe f entweder einen Wertzuwachs bzgl. der gespeicherten Dauer s oder einen Wertverlust bzgl. der wahrgenommenen Dauer t . Ein Wertzuwachs von s würde einer um einen fixen Betrag erhöhten Produktion von Impulsen pro Zeiteinheit entsprechen, während ein Wertverlust von t gleichzusetzen wäre mit einer um eben denselben fixen Betrag verminderten Impulsproduktion. Welche dieser beiden Möglichkeiten stellt sich als die plausiblere dar?

Die Interpretation von f als Wertzuwachsgröße von s bedeutete, daß der Wert der Standarddauer dann ansteigen müßte, wenn die Modalität mit Beginn der Testphase wechselt. Dies wiederum bedeutete eine Veränderung der Gedächtnisrepräsentation, verursacht durch eine Veränderung des äußeren Kontextes. Obwohl Veränderungen der Gedächtnisrepräsentation von Zeitintervallen in der Literatur diskutiert werden (z. B. die Verkleinerung des Wertes eines gespeicherten Intervalls bei *delayed-matching-to-sample*-Aufgaben; vgl. Spetch & Wilkie, 1982; s. Appendix 1), handelt es sich bei diesen Phänomenen um Veränderungen in der Zeitschätzung als Funktion des zeitlichen Abstandes zwischen der Aneignung des zu lernenden Intervalls und dessen Abruf aus dem Gedächtnis und nicht als Funktion einer Veränderung der Umwelt. Nach Beurteilung des derzeit vorhandenen Materials an empirischen Untersuchungen zur Veränderung des Zeitgedächtnisses wird dieser Interpretation von f insgesamt wenig Plausibilität zugesprochen.

Die Interpretation von f als Wertverlustgröße von t scheint mehr Erklärungskraft zu besitzen. Sie beinhaltet, daß die wahrgenommene Zeitdauer kürzer als die physikalische Zeitdauer ist. Der Verkürzung wahrgenommener Zeitintervalle werden in der Literatur zwei unterschiedliche Ursachen zugeschrieben: einerseits eine Verlangsamung der inneren Uhr mit einer dadurch verringerten Anzahl akkumulierter Impulse; andererseits eine Verzögerung des Beginns der Impulsakkumulation. Beides hätte zur Folge, daß ein Individuum mehr Zeit für die Impulsakkumulation benötigte, um das Kriterium der Standarddauer zu erreichen bzw. weniger Impulse akkumuliert würden, bis die Darbietung des Vergleichsreizes beendet ist. Der Effekt wäre eine Unterschätzung der dargebotenen Zeitintervalle.

Modalitätsbedingte Veränderungen in der Geschwindigkeit der inneren Uhr entbehren nicht einer gewissen Evidenz, doch können sie in diesem Falle gerade nicht als Erklärung herangezogen werden, da erstens – vgl. die Hypothesen zu Experiment 1 – unter Zugrundelegung ihrer Existenz unterschiedliche Verschiebungen der Gradienten für die AUD/VIS- und die VIS/AUD-Bedingung vorhergesagt wurden, und zweitens Veränderungen der Geschwindigkeit der inneren Uhr ein *proportionales* Anwachsen des Fehlers bedingten. Die Annahme eines *additiven* Fehlers verweist hingegen auf Komponenten des Zeitverar-

beutungssystems, deren Beitrag zur Gesamtvariabilität von Zeitschätzungen ein konstanter ist. Daher fällt der Blick auf die Hypothese der Verzögerung der Akkumulation und damit des gesamten Timingprozesses.

Wenn die Beurteilung eines Zeitintervalls sowohl von der Impulsrate des Schrittmachers als auch von der Menge an zugewendeter Aufmerksamkeit für die Verarbeitung von Zeit abhängig ist (vgl. Block & Zakay, 1996; Casini & Macar, 1997; Lejeune, 1998; Thomas & Brown, 1974; Thomas & Weaver, 1975; Zakay & Block, 1998), dann kann angenommen werden, daß die Impulsakkumulation immer dann unterbrochen wird, wenn ein Individuum Aktivitäten verrichtet, die nicht mit der Verarbeitung von Zeit zu tun haben. f würde in diesem Fall die reale, objektive Zeit widerspiegeln, für die der Zeitverarbeitungsprozeß unterbrochen ist.

Die Annahme von Zeitkosten im Zusammenhang mit dem Wechsel der Modalität wurde in verschiedenen Kontexten berichtet. Im Kontext der Zeitverarbeitung sind Hinton und Meck (1997) zu nennen, die im Zusammenhang mit der *peak procedure*-Methode (vgl. Appendix 1) Einflüsse von selektiver Aufmerksamkeit auf die Zeitschätzung berichten und die Hypothese vertreten, daß Schwankungen in der Aufmerksamkeit zu Verzögerungen auf Seiten des Schalters (*mode switch*) führten, was eine Verschiebung der Gradienten (*peak time*) zur Folge hätte. Sie bemerken, daß "if a subject is attending to one modality when another appears, it may require some time to switch attention to the proper modality" (p. 446).

Hinweise auf die potentielle Generalisierbarkeit von Zeitkosten bei crossmodalen Vergleichen stammen von empirischen Arbeiten aus der Gedächtnispsychologie. Chase und Calfee (1969) z. B. untersuchten den Einfluß der Modalität (auditiv versus visuell) auf die Erinnerungslleistung bzgl. Buchstaben. Mit einem Sternbergschen Gedächtnistest (vgl. Sternberg, 1966) fanden die Autoren, daß die Suchgeschwindigkeit geringer war (d. h. die Versuchspersonen mehr Zeit für eine Antwort benötigten), wenn Lern- und Testphase in unterschiedlichen statt in gleichen Modalitäten stattfanden. Elliott, Geiselman und Thomas (1981) führten einen sog. Trigramm-Wiedererkennenstest durch, in welchem Versuchspersonen drei Buchstaben lernen und später erinnern sollten. Sie stellten fest, daß erstens die Lei-

stung der Versuchspersonen mit zunehmender Dauer des Behaltensintervalls abnahm und daß zweitens die Leistungsabnahme schneller war, wenn Lern- und Testmodalität verschieden statt gleich waren. Elliott et al. (1981) nahmen an, daß bei Nichtübereinstimmung von Lern- und Testmodalität ein zusätzlicher Suchprozeß im Gedächtnis erforderlich ist, um die Gedächtnisspur zu aktivieren.

Wenn die Gedächtnisdauer mit der Modalität ihrer Aneignung (d. i. die Modalität der Lern- bzw. Trainingsphase) verknüpft ist, dann stellt sich die Frage, welcher Qualität diese Verknüpfung ist.

Experiment 6

Die Ergebnisse aus den crossmodalen Bedingungen der Experimente 1, 2, 4 und 5 lassen eine Assoziation zwischen der Modalität der Lernphase und der in dieser akquirierten Standarddauer vermuten. Der Grund für diese Vermutung liegt darin, daß (1) ein Einfluß der Modalität auf die Erinnerungsleistung bzw. auf die Diskrimination der Standarddauer in der Testphase vorhanden war und (2) dieser Einfluß durch den Wechsel der Modalität zwischen Lern- und Testphase wirksam wurde. Daraus folgt, daß der Vergleich zwischen gespeicherter Standarddauer und dargebotener Vergleichsdauer nicht unabhängig gegenüber den jeweiligen Modalitäten stattfinden kann und somit ebenfalls eine Abhängigkeit zwischen der Standarddauer und der Lernmodalität bestehen muß. Bestünde diese nicht, wäre also die Referenzdauer gleichgültig gegenüber der Modalität, innerhalb derer sie enkodiert und gespeichert wurde, bliebe der Effekt der Wechselwirkung zwischen Modalitätswechsel und Dauerschätzung zwangsläufig aus.

Die sich nun aufdrängende Frage ist die nach der Natur dieser Verbindung zwischen Referenzdauer und Modalität. Der Zusammenhang zwischen dem Zeitgedächtnis und der Modalität wurde erst neuerlich durch Penney, Allan, Meck und Gibbon (1998) und Penney, Gibbon und Meck (2000) untersucht (s. o.). Penney und Mitarbeiter favorisieren ein Modell, welches das Gedächtnis für Zeitintervalle als modalitätsunspezifisch charakterisiert. Werden zwei identische Intervalle in unterschiedlichen Modalitäten gelernt, bildet sich nach Penney et al. (2000) eine Mixtur aus beiden modalitätsspezifischen Intervallen zu einer einzigen Gedächtnisrepräsentation, deren numerischer Wert den Durchschnitt der Werte für die jeweiligen modalitätsspezifischen Intervalle bildet (p. 1774). Vordergründig besteht also zwischen den Daten der Experimente dieser Studie und dem Modell von Penney et al. (1998, 2000) ein Widerspruch, da hier eine Assoziation zwischen Gedächtnisdauer und Modalität geschlußfolgert wird, dort die Gleichgültigkeit derselben von der Modalität postuliert wird.

Das Gegenteil einer modalitätsunspezifischen Gedächtnisrepräsentation von Zeitintervallen ist die auf eine bestimmte Modalität spezifizierte Gedächtnisrepräsentation. Für

den Bereich der Zeitverarbeitung repräsentieren z. B. Hocherman und Ben-Dov (1979) diesen Ansatz. Zimmer (1993) unterscheidet zwischen unterschiedlich starken sog. Format- und Systemannahmen. Wird eine *starke Formatannahme* gemacht, dann werden spezifische Informationsformate bzw. Informationskodes gefordert (z. B. Anderson, 1983). Dies muß noch nicht notwendigerweise spezifische Verarbeitungssysteme implizieren. Eine *starke Systemannahme* liegt vor, wenn ein bestimmtes System die Inhalte repräsentiert und die Verarbeitung steuert, wobei vorausgesetzt wird, daß ein spezifisches System A von einem anderen System B unabhängig sei (z. B. Paivio, 1986). Bezogen auf die Modalität entspräche dem ein Gedächtnissystem, in dem je nach Enkodierungsmodalität unterschiedliche, modalitätsspezifische Subsysteme ausgebildet würden, die unabhängig voneinander die Speicherung und den Abruf von Intervallen ausführen. Das Postulat modalitätsspezifischer Verarbeitung korrespondiert häufig mit der Annahme, daß sich im Laufe der evolutionären Entwicklung im Organismus spezialisierte, modulare Subsysteme herausgebildet haben, innerhalb derer die Reizverarbeitung optimiert ist (vgl. Crowder, 1989; Sherry & Schacter, 1987).

Prinzipiell wäre gewissermaßen ein Kompromiß zwischen dem Modell von Penney et al. (1998, 2000) und der Annahme modalitätsspezifischer Codes bzw. modalitätsspezifischer Subsysteme möglich. Nimmt man an, daß zwischen der gespeicherten Dauer und der Modalität der Lernphase eine Assoziation besteht, so muß diese eine Vermischung von Intervallen unterschiedlicher Modalität nicht verhindern, solange die Assoziation nicht starr ist, sondern locker und flexibel. Die Unterscheidung zwischen einem modalitätsspezifischen Gedächtnis für Zeitintervalle und einer Assoziation zwischen dem repräsentierten Zeitintervall und der Modalität sollte sich in mindestens zwei Aspekten manifestieren:

- ‡ Eine Assoziation kann wieder gelöst werden, während ein spezifiziertes Gedächtnissystem eine stabile Trennung zwischen unterschiedlichen Bereichen (Modalitäten) impliziert.
- ‡ Eine Assoziation kann an Intensität variieren, während ein spezifiziertes Gedächtnissystem eher nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip funktioniert, d.

h. bereichsspezifische Informationen werden verarbeitet, bereichsunspezifische werden nicht verarbeitet.

Experiment 6 soll daher die Frage zu klären versuchen, ob die Verbindung zwischen Modalität und Dauer im Gedächtnis einer losen Assoziation entspricht, oder ob hingegen die Annahme einer Modalitätsspezifität des Gedächtnisses für Zeitintervalle ein besseres Modell darstellt.

In Experiment 6 wurden zwei Versuchsbedingungen miteinander kontrastiert. Während in beiden Bedingungen die Standarddauer sowohl in der auditiven Modalität als auch in der visuellen Modalität gelernt wurde, wurde die Testmodalität zwischen den Bedingungen variiert (auditiv versus visuell; vgl. Abbildung 20).

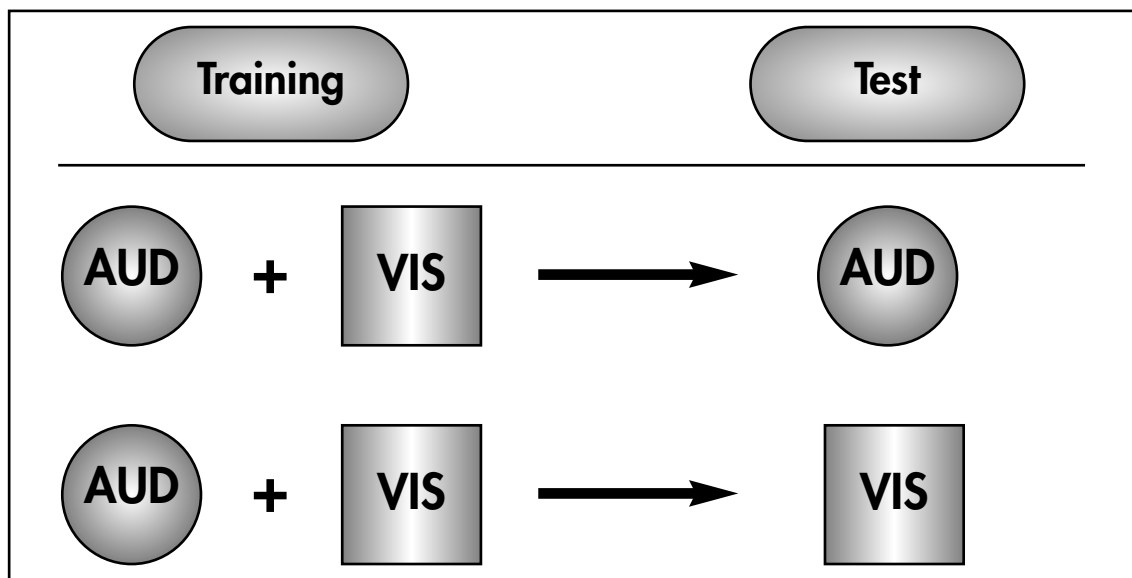


Abbildung 20. Schematische Darstellung der beiden Versuchsbedingungen in Experiment 6.

Ableitung von psychologischen Hypothesen
und Aufstellung testbarer statistischer Hypothesen

Ableitung der psychologischen Hypothesen (PHn)

PH 6-1: Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Penney et al. (1998, 2000) und der hier gewonnenen Daten läßt sich die Hypothese ableiten, daß eine Assoziation zwischen Ge-

dächtnisdauer und Lernmodalität besteht, diese aber nicht gleichzusetzen ist mit voneinander abgegrenzten, modalitätsspezifischen Codes oder Subsystemen im Gedächtnis für Zeitintervalle. In einer Generalisationsaufgabe sollte das Lernen eines Zeitintervalls (Standarddauer) in verschiedenen Modalitäten (auditiv und visuell) daher zu einer *multiplen* Assoziation zwischen der mentalen Repräsentation der Dauer und den beiden Modalitäten führen, wie sie in Abbildung 21 schematisch dargestellt wird.

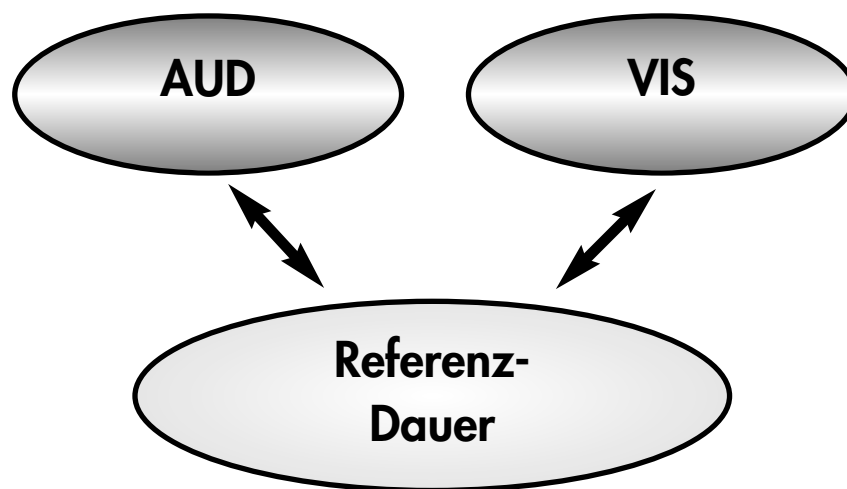


Abbildung 21. Schematische Darstellung möglicher Assoziationen zwischen der mentalen Repräsentation der Referenzdauer und den Modalitäten (PH 6-1). Erläuterungen im Text.

Wie auch in dem Modell von Penney et al. (1998, 2000) bildet sich eine Mixtur unterschiedlicher Werte für die beiden Intervalle, bedingt durch die unterschiedlichen Akkumulationsgeschwindigkeiten. Da Intervalle akustischer Signale schneller akkumuliert werden als Intervalle optischer Signale, ist der resultierende Wert eines akustischen Intervalls entsprechend größer als der eines gleich langen optischen Intervalls. Der bimodalen Enkodierung und Speicherung eines Intervalls folgt also die Durchschnittsbildung der jeweiligen Werte auf Gedächtnisebene. Dieser Durchschnittswert ist größer als der Wert, welcher sich aus einer rein visuellen Enkodierung ergäbe, und kleiner als der Wert, der aus einer rein auditiven Enkodierung resultierte. Werden in der anschließenden Testphase die Vergleichsintervalle unimodal dargeboten, sollte es diesen Überlegungen zufolge zu einem „klassischen“ Modalitäts-

effekt kommen, der sich in einer Verschiebung des Generalisationsgradienten niederschläge. Erfolgt die Testphase in der *auditiven* Modalität, sollte der Wert der (bimodalen) Standarddauer kleiner sein als der Wert eines physikalisch äquivalenten dargebotenen Intervalls. Entsprechend sollte in einer *visuellen* Testphase die Standarddauer einen größeren subjektiven Wert besitzen als ein objektiv gleich langes dargebotenes Vergleichsintervall.

PH 6-2: Inhaltliche Alternativhypothese ist die Annahme modalitätsspezifischer Verarbeitungssysteme (s. Abbildung 22).

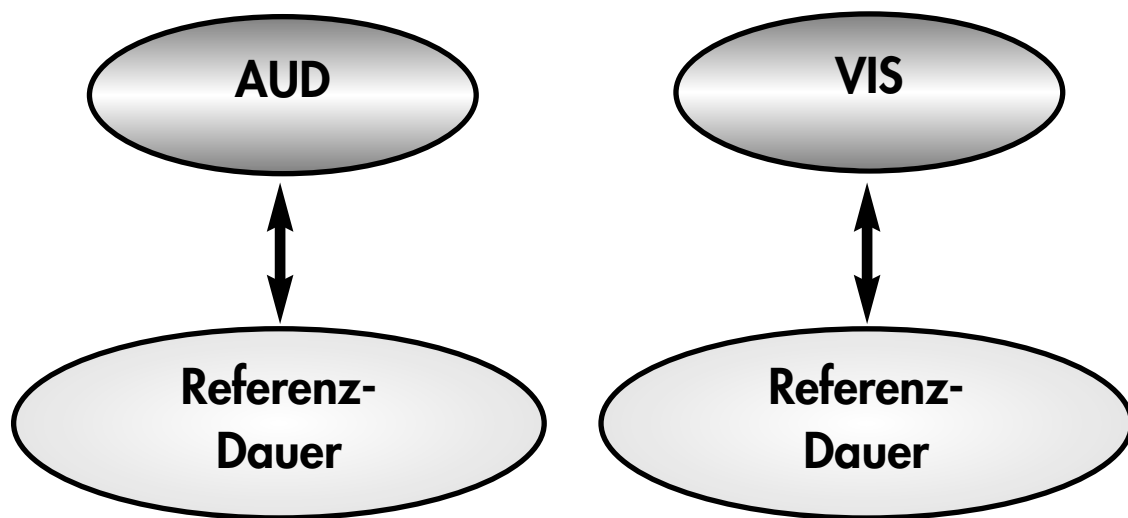


Abbildung 22. Schematische Darstellung modalitätsspezifischer, voneinander unabhängiger Subsysteme (*PH 6-2*). Erläuterungen im Text.

Für jede Modalität wird ein eigener Gedächtniskode bzw. ein eigenständiges Gedächtnissystem angenommen, mit bzw. in dem Intervalle gespeichert werden. Bei unimodaler Darbietung eines Vergleichsintervalls sollte nach Möglichkeit auf ein Referenzintervall für den Vergleich zurückgegriffen werden, das in derselben Modalität enkodiert wurde wie das Vergleichsintervall. Ist das Referenzintervall in beiden Modalitäten repräsentiert (entweder in einem eigenständigen Format oder in einem eigenständigen Teilsystem), dann sollte dasjenige Referenzintervall bevorzugt werden, dessen Format bzw. System dieselbe Modalität aufweist wie die Darbietungsmodalität des Vergleichsintervalls. Eine Durchschnittsbildung von auditiven und visuellen Intervallwerten sollte nicht stattfinden.

Für beide Hypothesen wird das Ausbleiben des in den vorangegangenen crossmodalen Experimenten gefundenen Gedächtniseffektes auf die Schätzung erwartet (der sich in einer rechtsseitigen Verschiebung der Gradienten widerspiegeln würde), da die Standarddauer mit beiden Modalitäten assoziiert ist und folglich ein „Umschalten“ zwischen Testmodalität und Trainingsmodalität nicht notwendig ist.

Aufstellen der statistischen Hypothesen (SHn)

Die beiden inhaltlichen Hypothesen *PH 6-1* und *PH 6-2* lassen sich auf statistischer Ebene zu einem Hypothesenpaar mit Alternativ- und Nullhypothese zusammenfassen.

Kasten 15.

Von der *PH 6-1* zur *SH 6-1a*.

PH 6-1: Zeitintervalle unterschiedlicher Modalitäten werden auf Gedächtnisebene gemeinsam repräsentiert. Folglich sollte es in der Testphase zu einer Vermischung der Werte kommen.

Aus der *PH 6-1* ergibt sich nachfolgende statistische Alternativhypothese:

SH 6-1a: In den jeweiligen modalitätsspezifischen Testphasen (auditiv und visuell) wird eine wechselseitige Verschiebung der Generalisationsgradienten erwartet. Für die auditive Testphase wird eine Verschiebung des Generalisationsgradienten nach links, für die visuelle Testphase eine Verschiebung nach rechts prognostiziert. Diese Verschiebungen werden operationalisiert als Differenz der relativen Häufigkeiten positiver Antworten zwischen der Darbietung von Intervallen größer als die Standarddauer und der Darbietung von Intervallen kleiner als die Standarddauer. In der visuellen Testphase sollten häufiger „Gleich“-Antworten bei Intervallen größer als die Standarddauer auftreten als in der auditiven

Testphase. Diese gerichtete Alternativhypothese läßt sich formal beschreiben durch:

$$M(DIFF_{VIS}) > M(DIFF_{AUD}).$$

Kasten 16.

Von der PH 6-2 zur SH 6-1b.

PH 6-2: Zeitintervalle unterschiedlicher Modalitäten werden auf Gedächtnisebene in verschiedenen Systemen bzw. in verschiedenen Kodes repräsentiert. Folglich sollte es in der Testphase zu keiner Vermischung der Werte kommen.

SH 6-1b: Wenn hingegen die PH 6-2 gilt, dann wird eine rechtsseitige Verschiebung des Gradienten der visuellen Testphase im Vergleich zum Gradienten der auditiven Testphase nicht erwartet; denn der Vergleich zwischen dargebotener und gespeicherter Dauer erfolgt in derselben Modalität, so daß das Verhalten der Versuchspersonen dem in einer unimodalen Bedingung entsprechen mußte. Es resultiert folgende Nullhypothese:

$$M(DIFF_{VIS}) \leq M(DIFF_{AUD}).^{14}$$

¹⁴ Obwohl inhaltlich nur eine Gleichheit der Gradienten hinsichtlich des Ausmaßes der Verschiebung erwartet wird, muß aus logischem Grund und im Hinblick auf das Testen einer Alternativhypothese gegen die Nullhypothese die Kleiner-Gleich-Relation verwendet werden. Die Alternativhypothese (SH 6-1a) muß auch dann abgelehnt werden, wenn der Gradient der visuellen Testphase im Vergleich zum Gradienten der auditiven Testphase nach links verschoben ist.

Kasten 17.**Von der PH 6-1 zur SH 6-2.**

SH 6-2: In der SH 6-1a und SH 6-1b fungieren beide Bedingungen wechselseitig als jeweils der anderen Bedingung entgegengesetzte Kontrollbedingungen. Unterschiedliche Verschiebungen der Gradienten beider Bedingungen können daher nur als *relative* Differenzen interpretiert werden. Daher wird ein weiteres, äußeres Kriterium eingeführt. Bei Gültigkeit der PH 6-1 sollten sich nämlich die relativen Verschiebungen der Gradienten auch gegenüber rein unimodalen Bedingungen zeigen. Deshalb wurden zur weiteren Analyse die unimodalen Bedingungen aus Experiment 1, das mit Ausnahme des fehlenden zweiten Teils der Trainingsphase in Material und Ablauf wesentlich mit Experiment 6 übereinstimmte, einbezogen.

Im Falle der Nichtbewährung der PH 6-2 (aus der statistisch eine Nullhypothese folgt) sollte sich *mindestens* entweder eine linksseitige Verschiebung des Gradienten der auditiven Bedingung oder eine rechtsseitige Verschiebung des Gradienten der visuellen Bedingung gegenüber der jeweiligen unimodalen Bedingung aus Experiment 1 nachweisen lassen:

$$SH\ 6-2a: M(DIFF_{EXP_6_AUD}) < M(DIFF_{EXP_1_AUD/AUD});$$

$$SH\ 6-2b: M(DIFF_{EXP_6_VIS}) > M(DIFF_{EXP_1_VIS/VIS}).$$

Methode

Versuchspersonen

An der Untersuchung nahmen 18 Versuchspersonen teil (vier Männer und 14 Frauen). Das Durchschnittsalter betrug 23.28 Jahre ($SD = 2.87$) mit einem Range von 19 bis 28 Jah-

ren. Die Versuchspersonen wurden zufällig einer der beiden Bedingungen ($n = 9$) zugewiesen und erhielten für ihre Teilnahme DM 15 bzw. 7,50 Euro.

Material, Hilfsmittel und Geräte

Die Standarddauer war 400 ms. Nichtstandard-Vergleichsdauern waren 100 ms, 200 ms, 300 ms, 500 ms, 600 ms und 700 ms.

Instruktion und Versuchsablauf

Instruktion und Versuchsablauf entsprachen weitgehend dem von Experiment 1. Hinzu kam in der Trainingsphase das Erlernen derselben Dauer in zwei Modalitäten. Die Trainingsphase bestand also aus zwei Komponenten: einer auditiven und einer visuellen Trainingskomponente. Die Trainingsphase begann mit der fünfmaligen Darbietung der Standarddauer in einer der beiden Modalitäten. Anschließend folgte eine Generalisationsaufgabe, in der die Versuchsperson die Standarddauer mit einem weiteren Intervall zu vergleichen hatte und entscheiden sollte, ob das Vergleichsintervall der Standarddauer entsprach oder nicht. Nach diesem Trainingsdurchgang folgte ein zweiter, der wiederum mit der fünfmaligen Präsentation der Standarddauer in der anderen Modalität begann. Die Versuchspersonen wurden explizit darauf hingewiesen, daß die Standarddauer trotz unterschiedlicher Darbietungsmodalität dieselbe war (vgl. Kasten 18).

Kasten 18.

Hinweis auf die Identität der Standarddauer trotz verschiedener Modalitäten

Nun wird Ihnen DIESELBE Dauer weitere fünf Mal dargeboten.
Im Unterschied zur akustischen Darbietung wird die Dauer nun visuell präsentiert.
Der Reiz, dessen Dauer Sie sich merken sollen, ist jetzt ein Rechteck.

Auch hier folgte im Anschluß eine Generalisationsaufgabe in der zweiten Modalität.

Jede einzelne Generalisationsaufgabe umfaßte 20 Versuchsdurchgänge. Die Einzelheiten der Generalisationsaufgabe entsprachen den im Abschnitt „Allgemeine Methode“ beschriebenen.

Die Reihenfolge der beiden modalitätsspezifischen Trainingsphasen wurde für die zweite Hälfte der Versuchspersonen einer jeden Bedingung vertauscht¹⁵. So konnte ein möglicher Einfluß der Reihenfolge experimentell weitgehend kontrolliert werden.

Nach Abschluß der Trainingsphase begann die Testphase, deren Komponenten und Durchführung denjenigen von Experiment 1 entsprachen. Vor Beginn der Testphase wurde den Versuchspersonen mitgeteilt, daß es hilfreich wäre, sich beim Vergleich zwischen dargebotener Dauer und Standarddauer auf diejenige Standarddauer zu beziehen, die der Modalität der dargebotenen Dauer entsprach (vgl. Kasten 19).

Kasten 19.

Wenn Sie also die Dauer der Rechtecke (resp. Töne; d. Verf.) beurteilen wollen, ist es sinnvoll, sich an die Dauer der Rechtecke (resp. Töne; d. Verf.) aus dem Lerndurchgang zu erinnern.

Damit war das experimentelle Design konservativ in Bezug auf die *PH 6-2*, damit im Falle einer vorhandenen Modalitätsspezifität des Zeitgedächtnisses diese auch möglichst leicht nachzuweisen wäre.

Die Testphase bestand aus 20 Blöcken resp. 200 Versuchsdurchgängen. Das gesamte Experiment dauerte im Schnitt 37.22 Minuten ($SD = 5.84$).

¹⁵ Da in jeder Bedingung neun Personen teilnahmen, konnte die Reihenfolge der Aufgabendarbietung nicht auf zwei gleiche Hälften aufgeteilt werden. So wurde in der auditiven Bedingung für die ersten vier Versuchspersonen zuerst die auditive und danach die visuelle Generalisationsaufgabe durchgeführt; bei den nächsten fünf verhielt es sich genau umgekehrt. In der visuellen Bedingung wurde für die ersten vier Versuchspersonen zuerst die visuelle und dann die auditive Aufgabe präsentiert; für die nachfolgenden fünf Versuchspersonen wurde entsprechend getauscht.

Ergebnisse

Abbildung 23 zeigt die Generalisationsgradienten der beiden Bedingungen von Experiment 6.

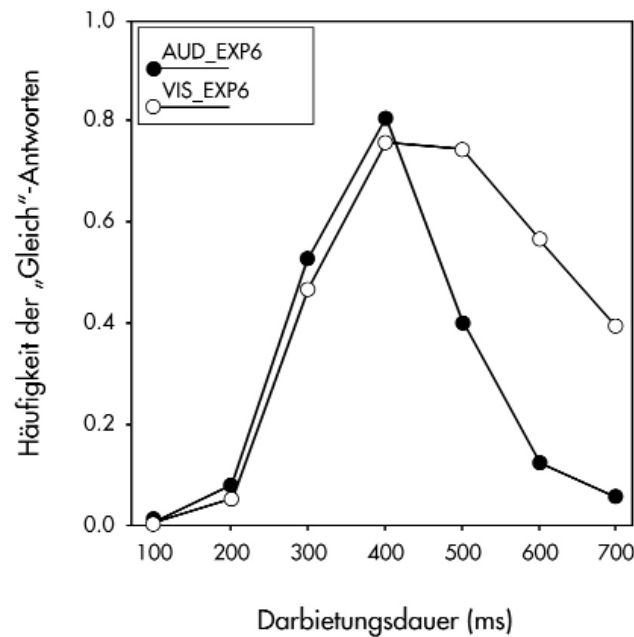


Abbildung 23. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 6. Gefüllte Kreise: Gradient der auditiven Testphase. Offene Kreise: Gradient der visuellen Testphase.

Deutlich sind Unterschiede zwischen beiden Gradienten zu sehen. Während bei Darbietung von Intervallen kleiner als die Standarddauer weitgehende Übereinstimmung in der Häufigkeit abgegebener „Gleich“-Antworten besteht, differiert diese doch erheblich bei Darbietung größerer Intervalle. In der visuellen Bedingung werden Intervalle größer als die Standarddauer häufiger mit dieser gleichgesetzt als in der auditiven Bedingung.

Eine Varianzanalyse mit Meßwiederholung prüfte die unterschiedlichen Häufigkeiten positiver Antworten auf Signifikanz. Abhängige Variable war die prozentuale Häufigkeit positiver Antworten. Unabhängige Variable war die Modalität der Testphase (auditiv versus visuell), die Stimulusdauer war der Meßwiederholungsfaktor.

Die Varianzanalyse ergab einen signifikanten Effekt der Dauer ($F(6, 96) = 36.622, p < .0001, \eta_p^2 = .696$), einen signifikanten Effekt der Modalität ($F(1, 16) = 14.239, p = .002, \eta_p^2 =$

.471) und eine signifikante Interaktion zwischen Dauer und Modalität ($F(6, 96) = 5.813, p < .0001, \eta_p^2 = .266$). Das bedeutet, daß sich beide Gradienten signifikant voneinander unterscheiden.

Prüfung der SH 6-1a gegen die SH 6-1b

Ob die gerichtete Hypothese einer wechselseitigen Verschiebung der Gradienten (*SH 6-1a*) statistisch nachweisbar ist, wurde mit einem t-Test für unabhängige Stichproben mit der Modalität als unabhängige Variable und der Differenz zwischen der Häufigkeit positiver Antworten bei Intervallen größer der Standarddauer und der Häufigkeit positiver Antworten bei Intervallen kleiner der Standarddauer als abhängige Variable erfaßt. Tabelle 21 zeigt die zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen.

Tabelle 21. Mittelwerte und Standardabweichungen des Unterschätzungskoeffizienten für die beiden Bedingungen aus Experiment 6.

<i>Bedingung</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
<i>AUD</i>	-0.0389	0.6836
<i>VIS</i>	1.1889	0.8699

Der t-Test wurde mit $t(16) = -3.329, p = .002$, signifikant. Die Effektstärke beträgt $d_{\text{emp}} = -1.581$. Damit kann die *SH 6-1a* angenommen werden, die *SH 6-1b* muß hingegen abgelehnt werden.

Prüfung der SH 6-2

Ferner wurde geprüft, ob die Differenz der Gradienten auch gegen ein äußeres Kriterium bestand hat. In Abbildung 24 (nächste Seite) sind die Gradienten aus Experiment 6 zusammen mit den Gradienten der unimodalen Bedingungen aus Experiment 1 abgebildet.

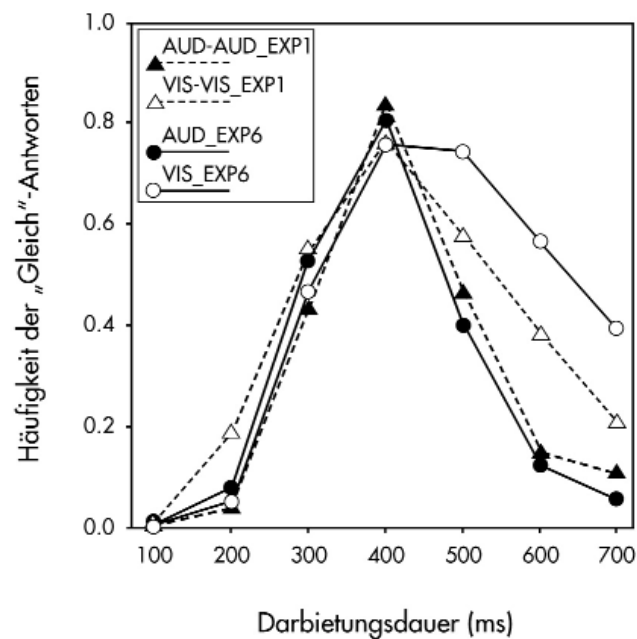


Abbildung 24. Generalisationsgradienten der Testphase von Experiment 6 und Generalisationsgradienten der Testphase der unimodalen Bedingungen von Experiment 1. Dreiecke und gestrichelte Linien: Gradienten von Experiment 1. Kreise und durchgezogene Linien: Gradienten von Experiment 6.

Zwei t-Tests wurden durchgeführt, in denen die Unterschätzungskoeffizienten aus Experiment 1 und Experiment 6 innerhalb jeder Modalität miteinander kontrastiert wurden. Der t-Test ergab folgende Statistiken: Für die auditive Bedingung (*SH 6-2a*): $t(17) = 0.757$, $p = 0.230$, und für die visuelle Bedingung (*SH 6-2b*): $t(17) = -1.979$, $p = .032$. Die Effektstärken betrugen für die auditive Bedingung $d_{\text{emp}} = 0.355$ und für die visuelle Bedingung $d_{\text{emp}} = 0.910$. Damit kann nur die *SH 6-2b* angenommen werden, da nur in der visuellen Bedingung ein signifikanter Unterschied zwischen dem Unterschätzungskoeffizienten aus Experiment 6 und dem aus Experiment 1 auftrat. Hingegen sind die Unterschiede in der auditiven Bedingung nicht signifikant. Die *SH 6-2a* muß daher abgelehnt werden.

Diskussion

Varianzanalytisch konnte ein Unterschied zwischen dem Gradienten der auditiven Testbedingung und dem Gradienten der visuellen Testbedingung festgestellt werden. Dieser

Unterschied kam dadurch zustande, daß in der visuellen Bedingung dargebotene Intervalle stärker unterschätzt wurden als in der auditiven Bedingung. Dies zeigte sich in der Verschiebung der Gradienten, da der Gradient der visuellen Bedingung stärker nach rechts verschoben war als der Gradient der auditiven Bedingung. Die rechtsseitige Verschiebung des Gradienten der visuellen Bedingung war auch dann noch nachweisbar, als ein außenstehendes Kriterium, nämlich die rein visuelle Bedingung von Experiment 1, verwendet wurde. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Vergleich mit der rein auditiven Bedingung des Experiments 1 zwar eine richtungskonforme, jedoch nicht signifikante Verschiebung für die auditive Modalität. Da die aus der *PH 6-2* folgende Nullhypothese jedoch bereits dann fallengelassen werden muß, wenn einer der beiden Teile der *SH 6-2* angenommen werden konnte, folgt daraus insgesamt, daß die *PH 6-2* nicht länger aufrechterhalten werden kann.

Wie sind diese Ergebnisse zu interpretieren? Für die Bestätigung der *PH 6-1* und damit der Hypothese eines *memory mixing* nach Penney et al. (1998, 2000) sprechen sowohl die relative Verschiebung beider Gradienten als auch die „absolute“ rechtseitige Verschiebung des Gradienten der visuellen Bedingung. Daß die Verschiebung in der auditiven Bedingung so gering war, kann Folge einer möglichen Dominanz der auditiven gegenüber der visuellen Modalität gewesen sein. Penney und Mitarbeiter (1998, 2000) diskutieren diesen Effekt im Zusammenhang mit Bisektionsexperimenten, in denen die Verteilung der Antworten der Versuchspersonen zwischen einer rein auditiven Bedingung und einer auditiv-visuellen Bedingung annähernd gleich ausfiel. Sie begründeten diesen Befund damit, daß innerhalb des Langzeitgedächtnisses die auditiv enkodierten gegenüber den visuell enkodierten Intervallen dominierten. Infolgedessen sollte die Verteilung der Werte eines bimodalen Gedächtnisses der eines rein auditiven Gedächtnisses sehr ähnlich sein. Bezogen auf die Ergebnisse dieses Experiments bedeutet das, daß die in der Trainingsphase erworbene bimodale Repräsentation der Standarddauer im Prinzip mit der in Experiment 1 erworbenen auditiven Repräsentation der Standarddauer zu vergleichen ist. Bleibt man dieser Parallele treu, dann entspräche die auditive Bedingung in Experiment 6 im wesentlichen der auditiven (AUD/AUD-) Bedingung aus Experiment 1, und der visuellen Bedingung des Ex-

periments 6 käme die AUD/VIS-Bedingung aus Experiment 1 nahe. Unterstellt man ferner, daß trotz einer möglichen auditiven Dominanz dennoch eine Vermischung von unterschiedlich großen Werten (aufgrund der modalitätsbedingten Unterschiede in der Akkumulationsgeschwindigkeit) stattgefunden hat, so würde man folgerichtig eine rechtsseitige, aber im Vergleich zur AUD/VIS-Bedingung von Experiment 1 abgeschwächte Verschiebung des Gradienten für die visuelle Bedingung und eine leichte, linksseitige Verschiebung des Gradienten für die auditive Bedingung erwarten. Genau dieses Ergebnis konnte in Experiment 6 festgestellt werden.

Die Ergebnisse des Experiments 6 können also durch die Annahme eines *memory mixing* mit auditiver Dominanz zufriedenstellend interpretiert werden.

Allgemeine Diskussion

In dieser Studie wurde untersucht, ob die jeder Wahrnehmung inhärente Sinnesmodalität auch Teil der Gedächtnisrepräsentation von kurzen Zeitintervallen ist. Mit sechs Experimenten konnte eine Antwort auf die Frage gefunden werden.

In Experiment 1 wurde festgestellt, daß Versuchspersonen dargebotene Zeitintervalle systematisch unterschätzten, wenn sich die Darbietungsmodalität (auditiv versus visuell) von der Modalität einer vorangegangenen Trainingsphase unterschied. In Experiment 2 konnte dieser Effekt mit einer schwierigeren Aufgabe repliziert werden. Mit Experiment 3 wurde gezeigt, daß innerhalb der auditiven Modalität Veränderungen der Stimulusqualität zwischen Trainings- und Testphase zwar einen Einfluß auf die Testleistung hatten, jedoch zu keiner systematischen Verschätzung dargebotener Intervalle führten. Dies läßt vermuten, daß der systematische Schätzfehler an einen Wechsel der Modalität gebunden ist. Mit zwei weiteren Experimenten wurde bestimmt, daß der Schätzfehler additiv und damit unabhängig von der Stimulusdauer ist und in etwa ein Ausmaß von 80 bis 100 ms aufweist. Schließlich konnte gezeigt werden, daß die Beziehung zwischen Modalität und Dauer auf Gedächtnisebene nicht in Form von distinkten Gedächtnissystemen oder Gedächtniskodes besteht, sondern besser als eine Assoziation zwischen einem über jeden Sinneskanal zugänglichen Zeitgedächtnis und der jeweiligen Enkodierungsmodalität charakterisiert werden kann.

Insgesamt ist also davon auszugehen, daß in der Tat ein Zusammenhang zwischen der Gedächtnisrepräsentation einer Dauer und der Modalität ihrer Enkodierung besteht und das Zeitgedächtnis damit als *modal*, d. h. als auf die Modalität bezogen, bezeichnet werden kann.

Die den Untersuchungen zugrundegelegte Theorie war die *scalar timing theory*. Die Gültigkeit dieser Theorie bzw. deren Anwendbarkeit sollte sich daher an jedem empirischen Ergebnis dieser Studie messen lassen können. Inwieweit läßt sich also die *scalar timing theory* mit den empirischen Resultaten vereinbaren? In Experiment 1 wurde die aus der *scalar timing theory* abgeleitete Hypothese geprüft, daß die Erinnerungsleistung in den Gruppen mit auditiver Trainingsphase besser ist als in den Gruppen mit visueller Trai-

ningsphase, daß also ein auditiver Trainingsvorteil besteht. Diese Hypothese mußte verworfen werden. Auch die zweite Hypothese, nach der in der Testphase akustische Signale als länger andauernd geschätzt werden sollten als optische Signale, konnte nicht angenommen werden. Der behauptete „Nulleffekt“ des Gedächtnisses für Zeitintervalle auf die Diskriminationsleistung in der Testphase bestätigte sich nicht; stattdessen konnte ein deutlicher, nicht vorhersagekonformer Gedächtniseffekt in den crossmodalen Bedingungen festgestellt werden. Nun soll geklärt werden, ob die Befunde dieser Studie *grundsätzlich* im Widerspruch zur *scalar timing theory* stehen, oder ob – und wenn, in welchem Maße – sie sich mit dieser vereinbaren lassen.

Der wesentliche Befund der Experimente 1 bis 5 war, daß dargebotene Zeitintervalle in der Testphase dann unterschätzt wurden, wenn die Modalitäten von Trainings- und Testphase verschieden waren. Dieser Effekt leitet sich aus keiner der in der *scalar timing theory* enthaltenen Annahmen ab. Nichtsdestotrotz hat sie einen Erklärungsbeitrag liefern können. Durch die in ihr spezifizierte Entscheidungsregel bzgl. der Gleich- oder Verschiedenheit zweier Zeitintervalle konnte der Unterschätzungseffekt *quantifiziert* werden, ohne grundsätzlich den postulierten Entscheidungsprozeß selbst in Frage stellen zu müssen. Durch die Quantifizierung des Schätzfehlers ist es möglich, den Effekt in die Theorie zu integrieren. Darüberhinaus findet die *scalar timing theory* weitere Bestätigung in den Ergebnissen von Experiment 6. Die Hypothese zweier getrennter, modalitätsspezifischer Gedächtnissysteme mußte zugunsten der Annahme eines einheitlichen Gedächtnissystems fallengelassen werden.

Was zu erledigen bleibt, ist neben der quantitativen die *inhaltliche* Integration der Ergebnisse in den theoretischen Rahmen. Hier zeigen sich offensichtlich Diskrepanzen zwischen Theorie und Empirie. Die Interpretation der Befunde insbesondere aus den Experimenten 1, 2, 4 und 5 *als Ergebnis einer Verknüpfung zwischen repräsentierter Dauer und Enkodierungsmodalität* und die damit verbundene Behauptung einer *qualitativen Bedingtheit der Gedächtnisdauer* ist nicht aus der *scalar timing theory* allein zu erklären. Zeitintervalle werden sowohl in der *scalar timing theory* als auch in anderen Dauerdiskriminationsmodel-

len als *Quantität* repräsentiert, welche in keinem qualitativen Verhältnis zu den Bedingungen ihrer Enkodierung steht. Es ist z. B. der Anzahl der im Gedächtnis gespeicherten Impulse, die eine bestimmte Dauer repräsentieren, nicht anzusehen, ob die Dauer ursprünglich über das visuelle oder auditive Sinnesorgan enkodiert wurde. Verbindungen zwischen der Gedächtnisrepräsentation der Dauer und ihrer Enkodierungsmodalität sind kein Bestandteil einer elaborierten psychologischen Zeittheorie. Es scheint daher, als ob der die Interpretation leitende theoretische Rahmen erweitert werden müßte.

Aus diesem theoretischen Mangel heraus ist es eine Option, das zeitpsychologische Forschungsparadigma einem anderen anzunähern, welches sich explizit spezifischen Repräsentationsannahmen gewidmet hat, nämlich dem gedächtnispsychologischen Forschungsparadigma. Eine Verknüpfung beider Forschungsansätze hat allerdings mit dem Mißstand zu kämpfen, daß die Erforschung des Gedächtnisses für Zeitintervalle bislang kaum einen Bezug zur gedächtnispsychologischen Forschung aufweist.

Bevor nun ein Modell des Zeitgedächtnisses unter Bezug auf beide Forschungsansätze entwickelt werden kann, sollte zunächst die experimentelle Aufgabe in dieser Studie auf dem Hintergrund des gedächtnispsychologischen Paradigmas analysiert werden.

Die Aufgabe – ein Rekognitionstest?

Die Generalisationsaufgabe beinhaltet neben der Rekognitionskomponente auch eine Diskriminationskomponente. Ob ein dargebotener Stimulus hinsichtlich seiner Dauer als gleich oder ungleich der Standarddauer beurteilt wurde, hing nämlich auch von der Präzision seiner Wahrnehmung ab. Je schlechter der Stimulus wahrgenommen wurde, desto eher sollte auch der Vergleich zwischen diesem und dem Standard fehlerbehaftet sein.

In diesem Aspekt wird ein wichtiger Unterschied zwischen der hier verwendeten Aufgabe und traditionellen Rekognitionsaufgaben aus der Gedächtnispsychologie deutlich. Bei letzteren ist die Wahrnehmung von Ziel- und Distraktorreizen i. d. R. eindeutig. Somit kann die Rekognitionsleistung auch nicht von Verzerrungen auf Wahrnehmungsebene beeinflusst werden.

Rekognitionsprozesse werden häufig als Prozesse beschrieben, die auf der Entscheidung beruhen, eine bestimmte Information als „bekannt“ zu identifizieren (Engelkamp, 1990). Diese Entscheidung kann auf zwei unterschiedlichen Wegen zustande kommen (Atkinson & Juola, 1974; Jacoby & Dallas, 1981; Johnston, Dark & Jacoby, 1985; Mandler, 1980). Einerseits liegt ein „echtes“ Wiedererkennen vor, insofern geprüft wird, ob ein Abbild eines dargebotenen Stimulus (resp. Items) im Gedächtnis vorhanden ist. Andererseits kann die Entscheidung auch dadurch entstehen, daß der dargebotene Stimulus der Versuchsperson „vertraut“ erscheint und von daher als „bekannt“ eingestuft wird, ohne daß er tatsächlich im Gedächtnis repräsentiert ist (vgl. auch Gillund & Shiffrin, 1984). Die Unterscheidung zwischen einem Rekognitionsurteil auf Grundlage eines tatsächlichen Abgleiches zwischen wahrgenommenem und gespeichertem Reiz und einem Rekognitionsurteil auf Grundlage wahrgenommener Vertrautheit ist so nicht auf das Erinnern eines Zeitintervalls übertragbar. Im Gegensatz zum Wiedererkennen von z. B. Wörtern einer Wortliste oder von Bildmaterial bestand in der hier verwendeten Aufgabe die Menge des erinnerbaren Materials aus nur *einem* Element, nämlich der Standarddauer. Die Entscheidung über „bekannt“ versus „nicht bekannt“ erfolgte daher allein über die wahrgenommene *Ähnlichkeit* zwischen der Dauer des Vergleichsreizes und der Dauer des Standardreizes. Je ähnlicher beide waren, desto wahrscheinlicher war die Identifizierung des Vergleichsreizes mit dem Standardreiz.

Erinnern als Funktion des Enkodierens

Wovon hängt es ab, ob ein Vergleichsreiz als Standardreiz identifiziert wird? Unter zeitpsychologischem Vorzeichen allein durch (a) die Ähnlichkeit zwischen gespeicherter Standarddauer und wahrgenommener Vergleichsdauer und (b) einem Entscheidungskriterium, anhand dessen die ermittelte Ähnlichkeit beurteilt und das Resultat einer Entscheidung zugeführt werden kann. Aus gedächtnispsychologischer Perspektive hingegen ist das Erinnern bzw. Behalten auch eine Funktion des Enkodierens (Engelkamp, 1990).

Verallgemeinernd kann man sagen: Eine Behaltensleistung wird um so besser sein, je mehr der Behaltenstest solche Informationen verlangt, die beim Lernen auch enkodiert worden sind. Oder, etwas anders formuliert: Der Retrievalerfolg ist um so größer, je mehr die Enkodier- und Retrievalprozesse überlappen. (Engelkamp, 1990, S. 43 f.)

Unter Enkodierung kann der Prozeß verstanden werden, mit dem zu lernendes Material im Gedächtnis abgelegt wird. "Encoding (...) refers to the process by which cognitive units (...) become permanent long-term memory traces" (Anderson, 1983, p. 171). Tulving und Mitarbeiter (z. B. Flexser & Tulving, 1978; Tulving & Thomson, 1971; Watkins & Tulving, 1975) zeigten in einer Reihe von Experimenten, daß die Erinnerung eines Items von dem *Kontext* abhing, in welchem dieses Item gelernt wurde. Zur Illustration dieses Zusammenhangs zwischen Enkodierung und Rekognition sei ein Experiment von Tulving und Thomson (1971) dargestellt. Versuchspersonen lernten z. B. das Wort „black“ in unterschiedlichen Bedingungen: einmal isoliert, d. h. ohne ein assoziatives Wort, zum anderen im Beisein von einem mit diesem stark assoziierten Wort („white“), schließlich in Anwesenheit eines mit diesem nur schwach assoziierten Wort („train“). In der anschließenden Testphase wurde die Rekognitionsleistung des Wortes in einem der drei unterschiedlichen Kontexte ermittelt. Es zeigte sich, daß das Wiedererkennen dann am besten war, wenn der Lernkontext mit dem Testkontext übereinstimmte. Aus dieser Beobachtung formulierte Tulving das sog. Enkodierspezifitätsprinzip (*encoding specificity principle*). "In its broadest form the principle asserts that only that can be retrieved that has been stored, and that how it can be retrieved depends on how it was stored" (Tulving & Thomson, 1973, p. 359). Und Jacoby und Craik (1979) schreiben: "The probability of recognition increases with an increase in the number of common features activated at encoding and retrieval" (p. 5).

Was genau wird während der Enkodierung eines Items enkodiert?

Jedes Item (Wort, Bild, Ton etc.) besteht aus einer Reihe wahrnehmbarer Merkmale, die häufig drei Merkmalskategorien zugeordnet werden: visuelle, akustische und semantische Merkmale ¹⁶ (Craik & Lockhart, 1972; Engelkamp, 1990; Hoffmann, 1986; Ja-

coby & Craik, 1979; Klix, 1984; Nelson, 1979; Nelson, Reed & Walling, 1976; Zimmer, 1993). Entsprechend der Stimulusmerkmale können merkmalspezifische Gedächtnisrepräsentationen gebildet werden („Marken“ bei Engelkamp, 1990). Die charakteristischen Merkmale eines Stimulus bzw. Items werden also durch den Enkodierprozeß in ein spezifisches Repräsentationsformat überführt. Paivio (1971) unterscheidet zwischen verbalen und nonverbalen Repräsentationen, Segal und Fusella (1971) differenzieren visuelle von auditiven Kanälen. Für die Repräsentation von Sprache werden häufig modalitätsspezifische und abstrakte Formate postuliert (De Gelder & Vroomen, 1992; Kempen & Huibers, 1983; Levelt, 1989). Anderson (1983) unterscheidet drei Repräsentationsformate: *temporal strings*, in denen die zeitliche Reihenfolge von Ereignissen repräsentiert wird; *spatial images*, durch die räumliche Information enkodiert wird; und abstrakte Propositionen (*abstract propositions*), in denen bedeutungshaltige Elemente und die Beziehungen zwischen diesen enthalten sind. Klimesch (1988) postuliert, daß in der Repräsentation eines Items der ganze Abbildungsprozeß selbst abgebildet wird. „Die Transformation eines Umweltreizes erfolgt durch eine Struktur von Verarbeitungsstufen, und das Format des Codes ist ein Abbild der Struktur der Verarbeitungsstufen.“ (Klimesch, 1988, S. 51)

Enkodierprozesse produzieren nicht nur mentale Abbilder von Umweltereignissen, sie aktivieren auch bestehende Gedächtnisrepräsentationen, sofern zwischen diesen Gemeinsamkeiten bestehen. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit, daß ein Gedächtnisinhalt erinnert werden kann, als Funktion von der *Höhe der Aktivierung* der betreffenden Gedächtnisrepräsentation betrachtet (z. B. Anderson, 1983; Cowan, 1988; Engelkamp, 1990; Gillund & Shiffrin, 1984). Vor diesem Hintergrund ist auch der Effekt des Enkodierkontextes auf die Rekognitionsleistung zu sehen: Bestehen zwischen Merkmalen der Lernsituation und Merkmalen der Testsituation Gemeinsamkeiten, so können diese Merkmale, falls sie zusammen mit dem zu lernenden Item enkodiert wurden, in der Testsituation das Zielmerkmal akti-

¹⁶ Letztere sollen für unsere Zwecke unberücksichtigt bleiben, da in den hier verwendeten Aufgaben die Bedeutungshaltigkeit der Stimulusdauer weder manipuliert noch erhoben wurde.

vieren und damit zu einer Erleichterung des Retrievalprozesses führen. Diese, die Erinnerung begünstigenden Merkmale, werden auch *retrieval cues* genannt (Tulving & Osler, 1968).

Gedächtnissysteme

Rekognitionsprozesse und Repräsentationsformate können nicht unabhängig von der Annahme bestimmter Gedächtnissysteme gedacht werden. In der Gedächtnispsychologie sind verschiedene Vorschläge zur Unterscheidung von Gedächtnissystemen gemacht worden. Für den hier zu behandelnden Untersuchungsgegenstand soll die Trennung nach der Behaltensdauer (kurz versus lang) genügen, also die Unterscheidung zwischen Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis. In moderneren Konzeptionen (Baddeley, 1986, 1990; Baddeley & Hitch, 1974; Engelkamp, 1990) wird das Kurzzeitgedächtnis, das eher als Speicherort verstanden wird, durch das Konzept des Arbeitsgedächtnisses (*working memory*) ersetzt (vgl. auch Kintsch & van Dijk, 1978; Schneider & Shiffrin, 1977). Der Begriff *Arbeitsgedächtnis* impliziert, daß dieses Gedächtnissystem weniger einen passiven Speicherort als vielmehr einen aktiven Prozeß der Bearbeitung von Informationen darstellt. Das Arbeitsgedächtnis dient mehreren Funktionen: Es erhält Informationen von unterschiedlichen sensorischen Speichern, behält diese für eine gewisse Zeitperiode aktiv, überträgt einen Teil dieser Informationen in das Langzeitgedächtnis und aktiviert andererseits Informationen des Langzeitgedächtnisses, um diese bearbeiten zu können. Informationen im Arbeitsgedächtnis werden grundsätzlich als aktiv angenommen, während Informationen des Langzeitgedächtnisses zwar nicht unbedingt als inaktiv, zumindest aber als vermindert aktiv betrachtet werden. Entscheidende Merkmale des Arbeitsgedächtnisses sind dessen begrenzte Kapazität und die Möglichkeit zu bewußter bzw. kontrollierter Informationsverarbeitung. Kontrollierte Informationsverarbeitung wird als modalitätsunabhängig angesehen und kann auf alle Reize angewendet werden (Baddeley, 1990; Baddeley & Hitch, 1974, 1977; Engelkamp, 1990).

Dem Langzeitgedächtnis wird im allgemeinen eine unbegrenzte Speicherdauer zugeschrieben, wenn auch der Zugriff auf Gedächtnisinhalte erschwert sein kann. Anderson

(1983) z. B. unterscheidet zwischen einem deklarativen (*declarative memory*) und einem prozeduralen (*production memory*) Gedächtnis. Das deklarative Gedächtnis beinhaltet Faktenwissen, das in unterschiedlichen Repräsentationsformaten (s. o.) abgelegt sein kann. Das prozedurale Gedächtnis besteht aus sog. Produktionen, Wenn-Dann-Regeln, die auf Inhalte des deklarativen Gedächtnisses angewendet werden können. Wissensinhalte können auf Grund der Eigenschaften der durch sie abgebildeten Dinge und Ereignisse mehr oder weniger stark sensorisch spezifiziert sein (z. B. Paivio, 1969, 1971, Bower, 1972). So bemerkt Klimesch (1988, S. 49):

(...) Codierungs-, Wahrnehmungs-, Gedächtnis-, aber auch Denkprozesse sind eng miteinander verflochtene Phänomene, die in unmittelbarer Wechselwirkung zueinander stehen und nicht unabhängig voneinander beschrieben und verstanden werden können.

Die Enkodierspezifität bei der Erinnerung von Zeitintervallen

Wie bereits festgestellt, lassen sich die empirischen Ergebnisse dieser Studie nicht allein unter Rückgriff auf die theoretischen Annahmen der *scalar timing theory* oder eines anderen quantitativen Modells der Zeitverarbeitung erklären und legen daher die Einführung einer Zusatzannahme aus dem Kanon gedächtnispsychologischer Modelle nahe. *Wenn, wie geschehen, die Standarddauer bei Konstanz der Modalität von Lern- und Testphase prinzipiell besser erinnert werden kann als bei einem Wechsel der Modalität zwischen Lern- und Testphase, dann sollte zwischen der Standarddauer und der Modalität ihrer Enkodierung eine Verbindung bestehen.* Kurz, es wird angenommen, daß Stimulusdauer und Stimulus- (bzw. Enkodierungs-) Modalität *gemeinsam* repräsentiert sind. Ist diese Annahme korrekt, ließe sich auch das Prinzip der Enkodierspezifität auf die Befunde dieser Studie anwenden. So könnte man bspw. annehmen, daß der Zugriff auf ein im Gedächtnis gespeichertes Zeitintervall dann relativ schneller bzw. leichter möglich ist, wenn zwischen der Modalität der Trainingsphase und der Modalität der Testphase Übereinstimmung be-

steht. Besteht diese Übereinstimmung nicht, dann sollte der Zugriff entsprechend erschwert sein.

Die Übertragung der Enkodierspezifität auf Prozesse der Erinnerung von Zeitintervallen soll im folgenden beleuchtet werden. Wie berichtet, war die Testleistung bzw. der Retrievalerfolg in den Experimenten 1, 2, 4 und 5 dann am höchsten, wenn die Modalität der Testphase identisch mit der Modalität der Trainingsphase war. Allerdings wurde die Diskrepanz zwischen der Testleistung modalitätsgleicher und modalitätsverschiedener Lern- und Abrufbedingungen verursacht durch die Unterschätzung dargebotener Zeitintervalle. Mit anderen Worten: *Weil* die Versuchspersonen der crossmodalen Bedingungen die Intervalle unterschätzten, wurde ihre Leistung insgesamt schlechter.

Aktivierung von gespeicherten Zeitintervallen

Ist damit schon die Übertragbarkeit des Konzeptes der Enkodierspezifität auf die Befunde dieser Studie gescheitert? Eine Vorhersage dieses Prinzips besteht ja darin, daß je mehr gemeinsame Merkmale zwischen den Items der Lernphase (Zielitems) und den Items der Testphase (Vergleichsitems) bestehen, desto eher werden die Zielitems erinnert. Indes, die Anzahl der gemeinsamen Merkmale zwischen Zielitem (Standarddauer) und Vergleichsitems (Vergleichsdauern) in den crossmodalen Bedingungen war tatsächlich geringer als in den unimodalen Bedingungen. Nach Anderson (1983) determiniert die Anzahl der Gemeinsamkeiten, die zwischen Zielitem und Vergleichsitem bestehen, die Höhe der Aktivierung des Zielitems. Aktivierung von Gedächtnisinhalten ist hingegen die notwendige Voraussetzung dafür, daß diese auch abgerufen werden können (vgl. Anderson, 1983; Anderson & Bower, 1972; Collins & Loftus, 1975). Folglich könnte das Zielitem „Standarddauer“ in den crossmodalen Bedingungen durch Darbietung des Vergleichsreizes tatsächlich weniger aktiviert worden sein als in den unimodalen Bedingungen. Nun war die Anzahl der relevanten Zielitems – anders als in gedächtnispsychologischen Untersuchungen – nicht besonders groß, sondern gleich eins. Da aber nur ein Item (nämlich die Standarddauer) im Gedächtnis re-

präsentiert war, ist nicht die Frage relevant, *ob* dieses Item aktiviert würde, sondern vielmehr, *wie schnell* dieses aktiviert würde bzw. wie schnell es dem Vergleichsprozeß zur Verfügung stünde. Auch Anderson (1983) sieht einen Zusammenhang zwischen Aktivationshöhe und Verarbeitungsgeschwindigkeit. "The level of activation of a piece of network structure determines how rapidly it is processed by the pattern matcher" (p. 95).

Unter der Annahme, daß die Darbietung bestimmter Merkmale eines Items die gleichen, im Gedächtnis repräsentierten Merkmale aktiviert, resultiert folgende Interpretation der Aktivierung von Zeitdauern im Langzeitgedächtnis:

Grundsätzlich kann die Referenzdauer (hier die Standarddauer) durch unterschiedliche Merkmale aktiviert werden: (a) durch den Stimulus, dessen Dauer beurteilt werden soll, und (b) durch die sprachliche Umschreibung einer Dauer. Beispielsweise werden in sog. Produktionsaufgaben Zeitintervalle produziert (z. B. durch das Drücken einer Taste), deren Repräsentation durch die Benennung eines Intervalls (z. B. „eine Sekunde“) aktiviert wird.

Analoger oder diskreter Vergleich von Zeitintervallen?

Ob Zeitintervalle analog zu ihrer tatsächlichen Dauer im Langzeitgedächtnis repräsentiert sind, ist nach wie vor Gegenstand der wissenschaftlichen Debatte und wird vor allem im Zusammenhang mit dem *choose short effect* (vgl. Spetch & Wilkie, 1982; siehe S. 44ff.) diskutiert. Alternativ zur Hypothese einer analogen Kodierung von Zeitintervallen wurde verschiedenerseits die kategoriale Enkodierung von Zeitintervallen behauptet (z. B. Church, 1980; Kraemer et al., 1985). Statt der mentalen Abbildung der Dauer eines Signals als Quantität sollen dieser Hypothese zufolge Kategorien wie z. B. „kurz“ oder „lang“ das Intervall repräsentieren.

Der Gegensatz zwischen analogen und nicht-analogen Repräsentationsformaten wurde nicht nur im Kontext von Zeitverarbeitung formuliert, sondern findet sich auch in der Gedächtnispsychologie. Dort werden analoge Repräsentationen als „Abbildungen, die die Eigenschaften (oder zumindest einige von ihnen) eines abzubildenden Objektes oder Umwelt-

ereignisses beibehalten (...)“, verstanden (Steiner, 1988, S. 99). Als Beispiele für analoge Repräsentationen gelten die vorgestellten Rotationen von dreidimensional gezeichneten Körpern, die von Shepard und Metzler (1971) experimentell untersucht worden sind. In diesen Experimenten wurden Versuchspersonen aufgefordert, jeweils zwei perspektivisch gezeichnete Körper zu vergleichen und zu beurteilen, ob die beiden Figuren identisch waren. Die Lage der Figuren konnte entweder auf der Bildebene oder „in der Tiefe“ zueinander verdreht sein. Je größer der Winkel war, um den die Versuchspersonen die Figuren mental zu drehen hatten, desto länger benötigten sie für die Abgabe einer Antwort. Dieses Resultat legt die Interpretation nahe, daß die kognitiven Prozesse der Versuchspersonen analog zu einer wirklichen Rotation waren. Die dem analogen Repräsentationsformat entgegengesetzte Position zur Frage des Charakters der Gedächtnisrepräsentation bildet die Annahme der Abbildung von Wissen durch sog. *propositionale Netzwerke*, innerhalb derer analoge Phänomene durch symbolische (abstrakt-semantische) Repräsentationsformen beschrieben werden können (z. B. Kosslyn, 1980; Pylyshyn, 1973, 1979).

Auch im Kontext numerischer Kompetenz werden analoge Repräsentationsformate diskutiert. Dehaene und Mitarbeiter (Dehaene, 1992; Dehaene, Dupoux & Mehler, 1990) schlagen für die Repräsentation von Zahlen (*numbers*) drei verschiedene Codes vor: einen sprachlichen Code (*auditory verbal word frame*), einen visuellen Code (*visual arabic number form*) und einen analogen Code (*analogue magnitude code*). Letzterer bildet die numerischen Größen als eine Verteilung von Aktivierung auf einer analogen *number line* ab. Im Gegensatz dazu nimmt z. B. McCloskey (1992) an, daß Zahlen durch amodale abstrakte Repräsentationen mental abgebildet werden.

Für die Verarbeitung von Zeitintervallen gesellt sich zu den aufgeführten Gegensatzpaaren (analog-kategorial, analog-semantisch, analog-amodal) ein weiterer Gegensatz zur analogen Repräsentation hinzu: die *diskrete* Repräsentation von Zeitintervallen. Analoge Kodierung zeichnet sich dadurch aus, daß das Abbild stetiger physikalischer Größen ebenfalls stetig ist; d. h. innerhalb gewisser Grenzen kann das analoge Abbild beliebige Zwischenwerte annehmen (vgl. Klaus, 1967, für einen Überblick zur Informationstheorie).

Diskrete Kodierung hingegen übersetzt eine stetige Größe in eine endliche Anzahl von Werten (z. B. ganze Zahlen). Ein Zeitintervall kann auf diese Weise durch die Anzahl von Impulsen innerhalb dieses Intervalls abgebildet werden. Die Anzahl der Impulse hängt von der Frequenz des Impulsgebers ab. Sind v_1 bzw. v_2 die kleinste bzw. größte auftretende Impulsfrequenz und T die Länge des Intervalls, so kann die Anzahl der Impulse innerhalb dieses Intervalls alle Werte n mit

$$v_1 \cdot T < n < v_2 \cdot T, n \in \mathbb{N}$$

annehmen. Abbildung 25 veranschaulicht den Unterschied zwischen analoger und diskreter Kodierung.

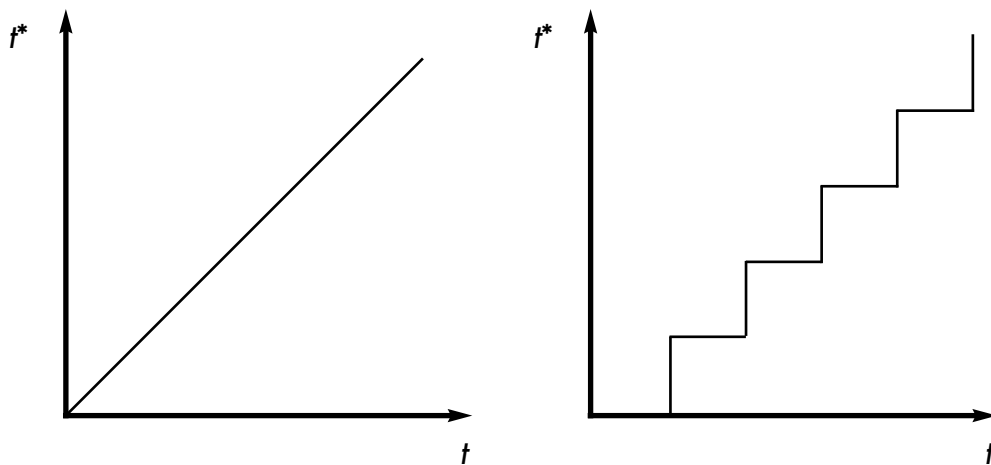


Abbildung 25. Analoge (links) und diskrete (rechts) Kodierung von Zeitintervallen. t = objektive Zeit, t^* = subjektive Zeit.

Wenn in der Literatur die Rede von analoger Kodierung ist, dann wird meistens zwischen analog und diskret kein Unterschied gemacht. Grant, Spetch und Kelly (1997, p. 220) z. B. verstehen unter analogen Repräsentationen von Zeitintervallen sowohl die (diskrete) Anzahl von Impulsen eines Schrittmachers als auch mentale Abbilder (bspw. Linien), deren Größe sich kontinuierlich mit der Länge des Intervalls verändert. Die *scalar timing theory* postuliert bezüglich der Repräsentation von Zeitintervallen im Langzeitgedächtnis ein eindeutig diskretes Format, insofern von einer Verteilung von (endlichen) Werten ausgegangen wird.

Wie läßt sich dieser Widerspruch lösen? Ob subjektive Zeit zutreffend als analog oder diskret beschrieben werden kann, hängt von ihrer Zuordnung zu einzelnen Komponenten des Zeitverarbeitungssystems ab.

Bereits auf Wahrnehmungsebene wird vielfach angenommen, daß kontinuierliche (physikalische) Zeit in diskrete Impulse übersetzt und damit „gequantelt“ wird. Für die Quantelung subjektiver Zeit finden sich in der Tat immer mehr Belege (z. B. Geißler, 1987, 1992; Kompaß & Geißler, 2001; Kristofferson, 1967, 1980, 1984). Der Informationsgehalt eines Signals (hier: die Signaldauer) kann mit der Kenntnis von diskreten, also abzählbaren Werten vollständig bestimmt werden (Klix, 1973, S. 55). Die „Aufbewahrung“ von Zeitinformation im Langzeitgedächtnis ist ebenfalls als diskreter Zustand auffaßbar. Auch die mentale „Berechnung“ von Differenzen zwischen unterschiedlichen Intervallen, wie sie in den mathematischen Beschreibungen des Vergleichsprozesses (z. B. Church & Gibbon, 1982; Wearden, 1992) zum Ausdruck kommen, setzt eine diskrete Repräsentation von Zeit voraus.

Andererseits ist subjektive Zeit ebenso wie objektive resp. physikalische Zeit immer an einen materiellen Trägerprozeß gebunden. Während die Zeitinformation selbst als diskreter Zustand betrachtet werden kann, ist die *Übertragung* von Zeitinformation und deren Austausch zwischen Komponenten des Verarbeitungssystems nur möglich durch einen materiellen Vorgang. Subjektive Zeit materialisiert sich dann nämlich in einem realen Prozeß, der sich – wie jeder andere Prozeß auch – in der Zeit entfaltet. Soll Zeitinformation aus dem Langzeitgedächtnis in das aktive Arbeitsgedächtnis zum Zwecke eines Vergleichs mit einer gegenwärtigen Signaldauer übertragen werden, müssen die diskreten Zustände des Langzeitgedächtnisses „einem Trägerprozeß aufgeprägt werden“ (Klix, 1973, S. 63). Man wird davon ausgehen können, daß der hierfür in Frage kommende Trägerprozeß der gleiche ist wie der für die Übertragung einer physikalischen Signaldauer in ein frühes, wahrnehmungsmäßiges Abbild: die Übersetzung einer Dauer in eine Sequenz von Impulsen. Aktivierung einer gespeicherten Dauer scheint also dasselbe zu bedeuten wie die Umwandlung eines (inaktiven) Dauersymbols in einen realen, dauernden Prozeß. Die eher statische Repräsentation der Dauer im Langzeitgedächtnis avanciert zu einer „dynamischen mentalen Reprä-

sensation“, in der die zeitliche Dimension unauflösbarer Bestandteil der Repräsentation ist (Freyd, 1987, 1992). Kristofferson (1977) hält die Annahme eines spezifischen Kodierungsformats für subjektive Zeit generell für nicht notwendig.

However, it is not even necessary to assume that these internal time intervals are stores in “coded” form. It is possible that they are simply the real duration of automatic, highly stable, memorial chains (...). (Kristofferson, 1977, p. 116)

Der Vergleich zweier Zeitintervalle setzt voraus, daß beide in demselben Format repräsentiert sind. Es ist naheliegend, daß dieses Format ein analoges ist, d. h. ein realer Prozeß. Der Grund hierfür liegt u. a. in der Natur des Vergleichsprozesses. Der Vergleich selbst ist ein Vorgang, also ein Prozeß, innerhalb dessen das Größensymbol (diskreter Wert) in eine *reale* (analoge) Größe umgewandelt werden muß, damit eine Bewertung der beiden zu vergleichenden Dauern erfolgen kann. Wäre dem nicht so, müßten wie beim Zählen Symbole (hier akkumulierte Impulswerte) zueinander in Relation gebracht und eine Entscheidung über die unterschiedliche Wertigkeit der Symbole *qua Konvention* getroffen werden („3“ ist kleiner als „4“). Es gibt allerdings keine Anhaltspunkte dafür, daß die vermutlich hochfrequenten Impulse tatsächlich in diesem Sinne gezählt werden.

Daß die subjektive Dauer, wenn sie von einem System zu einem anderen transferiert wird, den Status von diskreten Werten verliert und in ein analoges Format überwechselt, behaupten im übrigen auch die Autoren der *scalar timing theory*. Meck z. B. erwähnt alternativ zur Annahme einer direkten Übertragung von Zeit-Werten aus dem Akkumulator/Arbeitsgedächtnis in das Langzeitgedächtnis, daß die Dauer des Einspeicherns der Zeit-Werte in das Langzeitgedächtnis abhängig ist von der Größe der Werte (Meck, 1983, p. 189). Je kleiner der akkumulierte Wert, desto schneller kann die Dauer eingelesen (eingespeichert) werden und desto geringer wird entsprechend der Wert der repräsentierten Dauer sein; und vice versa, je größer der akkumulierte Wert, desto langsamer kann die Dauer eingelesen werden und desto größer wird der Wert der gespeicherten Dauer sein (vgl. auch Gibbon, 1991; Hinton & Meck, 1997).

Einen analogen Vergleichsprozess vorausgesetzt, bedingt die prospektive Beurteilung eines dargebotenen Intervalls, daß das Referenzintervall bereits aktiviert ist. Der Grund liegt

darin, daß der Vergleich zwischen dargebotener (wahrgenommener) Dauer und Referenzdauer nicht über den Vergleich von Werten erfolgt, sondern analog, d. h. *in der Zeit* stattfindet. Der analoge, sich in der (realen) Zeit erstreckende Vergleich resultiert aus dem analogen Charakter subjektiver Zeit selbst. Ein Intervall kann nur dann korrekt hinsichtlich seiner Größe beurteilt werden, wenn das Vergleichsintervall zeitgleich, also ohne Verzögerung, angesetzt wird. In Abbildung 26 wird diese Annahme illustriert.

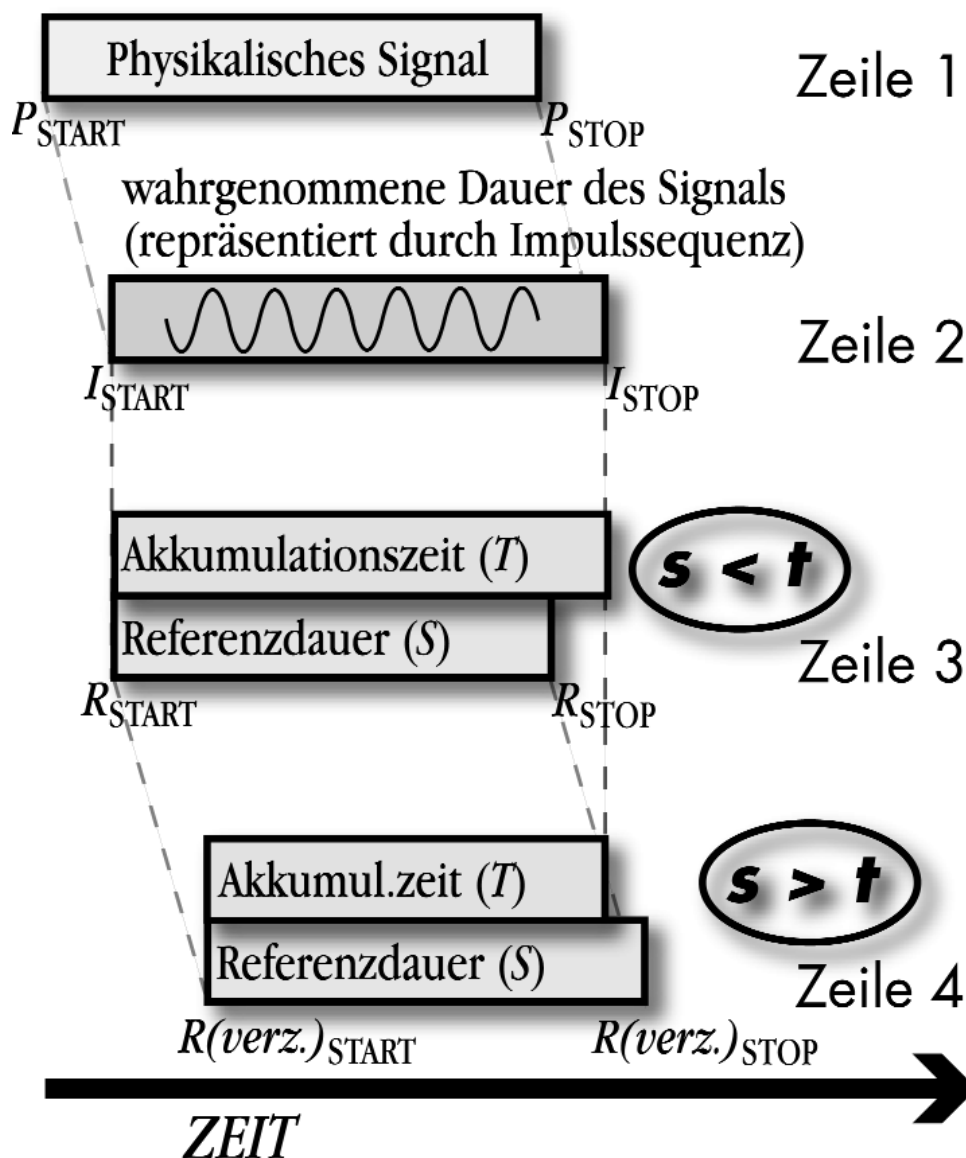


Abbildung 26. Veranschaulichung des analogen Intervallvergleichs. Zeile 1 zeigt ein Symbol für das physikalische Signal (z. B. ein Ton oder ein Bild), dessen Dauer beurteilt werden soll. Die Darbietung dieses Signals beginnt zum Zeitpunkt P_{START} und endet zum Zeitpunkt P_{STOP} . Die interne Abbildung der Signaldauer (Zeile 2) erfolgt mit gewisser Latenz zum Zeitpunkt I_{START} (mit dem Beginn des Aussendens von Impulsen der inneren

Uhr) und endet zum Zeitpunkt I_{STOP} . Der Prozeß des „Lesens“ der Referenzdauer (S) beginnt zum Zeitpunkt R_{START} und endet zum Zeitpunkt R_{STOP} . Um einen analogen Vergleich zu ermöglichen, muß der Beginn des „Lesens“ der Referenzdauer (S) mit dem Beginn der Impulsakkumulation (T) zusammenfallen. Als ein Beispiel ist in Zeile 3 die Referenzdauer kürzer als die Akkumulationszeit ($S < T$). Daraus folgt, daß eine Versuchsperson die Dauer des Signals als länger beurteilen würde als die Referenzdauer. Falls jedoch, wie in Zeile 4 dargestellt, der Beginn des „Lesens“ der Referenzdauer verzögert ist ($R(\text{verz.})_{\text{START}}$), würde die Signaldauer unterschätzt werden, da der Akkumulationsprozeß (T) kürzer als die Referenzdauer (S) ist.

Überträgt man die Forderung des analogen Vergleichs auf das Zeitverarbeitungsmodell von Gibbon und Church (1984) bzw. Gibbon, Church und Meck (1984), dann ist (1) zu postulieren, daß das „Einlesen“ sowohl der akkumulierten Dauer des Arbeitsgedächtnisses als auch der Referenzdauer in den Komparator zeitlich parallel stattfinden muß.

The theoretical description of the timing process (...) is a parallel process in which a sample from a distribution of memory of times of reinforcement, a sample from a distribution of decision thresholds, and ratio comparisons between clock and memory values occur while the time accumulation process is occurring. (Church, Meck & Gibbon, 1994, p. 152)

Nun ist das Arbeitsgedächtnis nichts anderes als eine Kopie des Akkumulators (Gibbon & Church, 1984, p. 469), und auch der Vergleichsprozeß findet im Arbeitsgedächtnis statt (vgl. Wearden, 1999). Daher soll hier vereinfachend (2) postuliert werden, daß sowohl die Akkumulation von Impulsen als auch der schließliche Vergleich der Menge akkumulierter Impulse mit dem Wert der Referenzdauer *Teilprozesse des Arbeitsgedächtnisses* darstellen, die *zeitgleich* stattfinden. Anders formuliert: Die Aufsummierung von Impulsen im Akkumulator korrespondiert mit deren kurzfristiger Speicherung und dient gleichzeitig als Vergleichsgrundlage in Bezug auf die Dauer des Referenzgedächtnisses. Diese beiden Postulate ziehen eine wichtige Implikation nach sich: Wenn Akkumulation von Impulsen, kurzfristige Speicherung und Vergleich funktional identisch sind, und wenn ferner die Beurteilung des wahrgenommenen Intervalls eine aktivierte Referenzdauer voraussetzt, dann kann auch der Akkumulationsprozeß selbst erst mit Aktivierung der Referenzdauer erfolgen.

Nun ist denkbar, daß die Referenzdauer, ähnlich wie andere im Gedächtnis repräsentierte Inhalte auch, unterschiedlich stark aktiviert werden kann und darüberhinaus die Stär-

ke bzw. Höhe der Aktivierung einen direkten Einfluß auf die Wahrscheinlichkeit bzw. Geschwindigkeit ausübt, mit der die Referenzdauer aktiver Bestandteil des weiteren Verarbeitungsprozesses wird. So schreiben z. B. Anderson, Reder & Lebiere (1996) in Bezug auf die Aktivierung von deklarativem Wissen (hier *chunks*): „The levels of activation determine the odds that a chunk will be retrieved and the time to perform that retrieval“ (p. 225). Ähnliche Annahmen zur Rolle von Aktivierung von Gedächtnisinhalten bezüglich des Retrievalerfolgs finden sich u. a. bei Anderson, 1983, Anderson, 1993, Cowan, 1988, Gillund & Shiffrin, 1984, McClelland & Rumelhart, 1986, sowie Rumelhart & McClelland, 1986.

Je höher die Referenzdauer aktiviert ist, desto schneller sollte sie also dem Vergleichsprozeß zur Verfügung stehen. Je geringer die Aktivationshöhe hingegen, desto länger sollte es folglich dauern, bis die Impulse des Schrittmachers akkumuliert werden. Die Höhe der Aktivierung sollte also einen direkten Einfluß auf die Latenz zwischen Beginn der Impulsproduktion und Beginn der Impulsakkumulation haben. Der Mechanismus, der die Impulsakkumulation verzögern kann, ist der sog. Schalter (*switch*; vgl. Seite 41). Das bedeutet, daß der Schalter sich erst dann schließen und damit eine Akkumulation ermöglichen sollte, wenn die Referenzdauer dem Vergleichsprozeß zur Verfügung steht.

Bezogen auf die unimodalen Bedingungen stellt sich ein möglicher Ablauf der Zeitschätzung folgendermaßen dar: Durch die Darbietung eines bspw. akustischen Stimulus wird die Repräsentation der auditiv enkodierten Standarddauer aktiviert. Da aufgrund der gemeinsamen Merkmale von Ziel- und Vergleichsitem die Aktivationshöhe relativ hoch ist, ist auch die Geschwindigkeit, mit der die aktivierte Standarddauer in den Komparator eingelesen wird, relativ hoch. Je schneller die Standarddauer im Komparator bzw. im Arbeitsgedächtnis ist, desto eher kann die Dauer des dargebotenen Vergleichsstimulus enkodiert werden. In den crossmodalen Bedingungen dagegen führt die Darbietung eines akustischen Signals zu einer geringeren Aktivierung der (hier) visuell enkodierten Referenzdauer. Das bedeutet, daß die Standarddauer langsamer in den Vergleichsprozeß eintritt und folglich die Enkodierung der Vergleichsdauer stärker verzögert wird. Ob für die Aktivierung der Standarddauer in den crossmodalen Bedingungen ein zusätzlicher Prozeß aufgewendet werden

muß, bleibt offen. Der Argumentation von Grondin und Rousseau (1991) zufolge erfordert die crossmodale bzw. intermodale Verarbeitung von Zeitintervallen die Unterstützung zusätzlicher Ressourcen, während die unimodale bzw. intramodale Verarbeitung automatisch abläuft.

Was spiegelt nun der konstante Unterschätzungsbetrag wider? Die Verzögerung, so ist argumentiert worden, setzt beim Schalter an, also zwischen Impulsproduktion (Schrittmacher) und Impulsakkumulation (Akkumulator). Das Ausmaß der Verzögerung geht auf die Höhe der Aktivierung zurück. Der konstante Betrag der Verzögerung läßt daher auf eine konstante Differenz zwischen der Aktivationshöhe in den unimodalen Bedingungen und der Aktivationshöhe in den crossmodalen Bedingungen schließen. Die Länge der Standarddauer sollte dabei unerheblich sein, wenn nicht eine bestimmte Dauerrepräsentation, sondern das Zeitgedächtnis *als ganzes* aktiviert wird. Ausschließlich die Anzahl gemeinsamer Merkmale zwischen Zielitem (Standarddauer) und Vergleichsitem (Vergleichsdauer) hat Einfluß auf die Verzögerung. Ebenso wie diese war auch die Differenz der Anzahl gemeinsamer Merkmale zwischen unimodalen und crossmodalen Bedingungen konstant.

Integration der Ergebnisse von Experiment 3 und 6

In der Argumentation sind bislang die Ergebnisse von Experiment 3 (Sinuston versus Rauschen) und Experiment 6 (bimodale Trainingsphase) unberücksichtigt geblieben. Diese sollen nun integriert werden.

In Experiment 3 war kein differentieller Unterschätzungseffekt festzustellen. Folglich sollte der Zeitverarbeitungsprozeß nicht verzögert und damit auch keine Differenz in der Aktivationshöhe zwischen den Bedingungen vorhanden gewesen sein. Dies würde bedeuten, daß ein Sinuston bestimmter Dauer in der Lage ist, die gespeicherte Referenzdauer eines Rauschsignals ebenso zu aktivieren wie die Referenzdauer eines Sinustons. Dies mag insofern einleuchten, als beides akustische Signale sind. Da die Aktivierung der Referenzdauer des Langzeitgedächtnisses von der Präsenz eines aktivierten Inhaltes im Arbeitsge-

dächtnis ausgeht und ferner das Kodierungsformat des Arbeitsgedächtnisses entweder auditiv oder visuell ist (Card, Moran & Newell, 1983), sollte der Einfluß physikalischer Parameter (wie z. B. Intensität oder Frequenz) auf die Aktivierung von Langzeitgedächtnisinhalten vernachlässigbar sein.

In Experiment 6 war ebenfalls kein systematischer Unterschätzungseffekt nachweisbar. Zunächst: Es war ein solcher auch nicht erwartet worden; denn die in diesem Experiment gebildeten Bedingungen waren keine wirklich crossmodalen Bedingungen. In jeder Bedingung war die Modalität der Testphase auch Bestandteil der Trainingsphase. Das Hauptergebnis von Experiment 6 war sicherlich der Hinweis auf die Vermischung der auditiv und visuell enkodierten Standarddauern (*memory mixing*). Wie läßt sich die Vermischung der Dauerwerte erklären? Zunächst müssen drei Dinge vorausgesetzt werden: Erstens sollte ein eigenständiges Gedächtnis für Zeitintervalle existieren. Zweitens sollten die in diesem Gedächtnis repräsentierten Dauern miteinander in Verbindung stehen, so daß eine „Vermischung“ überhaupt stattfinden kann. Schließlich muß das Repräsentationsformat der Dauern quantitativ und analog sein: je länger das physikalische Intervall, desto ausgedehnter auch dessen Repräsentation. Die Darbietung eines Stimulus bestimmter Dauer sollte das Gedächtnis für Zeitintervalle aktivieren. Die Aktivierung kann erleichtert und begünstigt werden, wenn die Modalität der Reizdarbietung der Modalität der Enkodierung der Referenzdauer entspricht. Im Falle einer bimodalen Trainingsphase ist das Gedächtnis für Zeitintervalle sowohl mit der auditiven als auch mit der visuellen Modalität assoziiert. Insofern sollte kein differentieller Aktivierungsvorteil zwischen der Darbietungsmodalität eines Vergleichsreizes in der Testphase bestehen. Die Vermischung kann nun dadurch entstehen, daß aus dem Gedächtnis für Zeitintervalle für den Vergleichsprozeß jeweils ein Dauerwert gezogen wird. Da wegen der gleichen Anzahl von Versuchsdurchgängen in der Trainingsphase für jede Modalität folglich auch gleich viele auditiv und visuell enkodierte Werte zur Verfügung stehen, sollte die Wahrscheinlichkeit des Ziehens eines Dauerwertes zwischen den Modalitäten gleich sein. Im Durchschnitt geht also in den Vergleichsprozeß ein Wert ein, der genau das arithmetische Mittel zwischen auditivem und visuellem Wert bildet.

Allerdings scheint dieses Ergebnis im Widerspruch zur Annahme einer Assoziation zwischen Enkodierungsmodalität und Dauer zu stehen. Bereits in den Hypothesen zu Experiment 6 wurde aber auf die Möglichkeit multipler Assoziationen hingewiesen: die zu lernende Standarddauer wird nicht nur mit einer, sondern mit beiden Lernmodalitäten verknüpft. Wird in der anschließenden Testphase ein Vergleichsintervall in z. B. visueller Modalität dargeboten, könnte der optische Reiz die mit dem Zeitgedächtnis verbundene Repräsentation der visuellen Modalität aktivieren, welche ihrerseits das Zeitgedächtnis aktiviert. Umgekehrt könnte ein auditiv dargebotenes Vergleichsintervall die mit dem Zeitgedächtnis assoziierte auditive Modalität und mit dieser das Zeitgedächtnis selbst aktivieren. Abbildung 27 veranschaulicht die Aktivierungsprozesse. In beiden Fällen ist das Ausmaß an Aktivierung des Zeitgedächtnisses und damit die Geschwindigkeit, mit der die in diesem repräsentierten Intervalle in den Vergleichsprozeß einziehen, gleich.

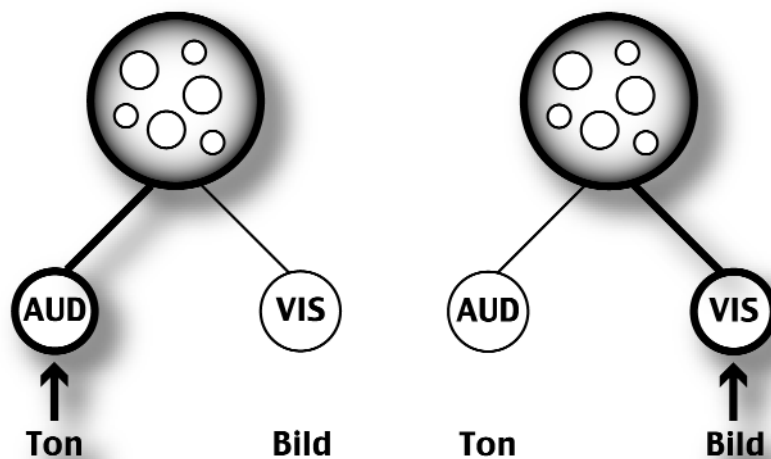


Abbildung 27. Aktivierung des bimodalen Zeitgedächtnisses (Experiment 6). Links: Die Darbietung eines akustischen Signals (z. B. eines Tons) aktiviert die Gedächtnisrepräsentation des auditiven Trägersignals der Standarddauer. Das mit der Repräsentation des Trägersignals assoziierte Zeitgedächtnis wird dadurch ebenfalls aktiviert. Rechts: Die Darbietung eines optischen Signals (z. B. eines Bilds) aktiviert die Gedächtnisrepräsentation des visuellen Trägersignals der Standarddauer, welche ebenfalls das Zeitgedächtnis aktiviert. Die beiden unterschiedlichen Größen der im Zeitgedächtnis repräsentierten Intervalle illustrieren die zwischen auditiv und visuell enkodierten bestehenden Impulsdifferenzen: ein kleiner Kreis symbolisiert einen visuell enkodierten Dauerwert, ein großer Kreis einen auditiv enkodierten Dauerwert.

Wie läßt sich mit diesem Modell die postulierte auditive Dominanz erklären? Leider finden sich bei Penney und Mitarbeitern (Penney et al., 1998, 2000) keine Hinweise auf mög-

liche Entstehungsursachen, so daß an dieser Stelle der Versuch einer Erklärung unternommen werden muß. Zunächst muß geklärt werden, was auditive Dominanz in diesem Zusammenhang bedeuten könnte. Es scheint so, als ob die Werte, mit denen dargebotene Intervalle verglichen werden, vorwiegend auditiv enkodiert sind. Möglicherweise ist dies deshalb der Fall, da auditiv enkodierte Werte – innerhalb des Zeitgedächtnisses – „größer“ als visuell enkodierte Werte sind und daher eine höhere Aktivationsstärke aufweisen könnten. Höher aktivierte Items sollten daher mit größerer Wahrscheinlichkeit in den Vergleichsprozeß eintreten als niedriger aktivierte Items. Ein Argument im Hinblick auf die funktionale Ähnlichkeit zwischen der Abbildung von Zeit auf psychologischer Ebene und der Abbildung von Zeit auf neurologischer Ebene mag diesen Gedankengang unterstützen. Nach Anderson (1983) ist Aktivierung näherungsweise gleichwertig mit der Erregung von Nervenzellen. „At some level of abstraction it is reasonable to identify activation with rate of neural firing.“ (Anderson, 1983, p. 27) Nun kann der Faden wie folgt weitergesponnen werden: Auch subjektive Zeit kann als eine Menge von „feuernden Neuronen“ betrachtet werden (Miall, 1989, 1992). Gesetzt den Fall, daß nicht nur die Summe von Impulsen eines internen Schrittmachers auf Gedächtnisebene repräsentiert, d. h. auf den verschiedenen Stufen der Gedächtnisrepräsentation – Akkumulator, Kurzzeitgedächtnis, Langzeitgedächtnis – abgebildet wird, sondern darüber hinaus auch Information über die Impulsfrequenz selbst dort abgelegt wird (bzw. über die Geschwindigkeit, mit der die Impulse in den Akkumulator einziehen), dann wäre es durchaus möglich, daß Gedächtnisinhalte mit höherer Frequenz im Vergleich zu solchen mit niedrigerer Frequenz auch eine höhere Aktivationsstärke aufweisen. Das Ergebnis wäre, daß sich auditiv enkodierte Intervalle gegenüber visuell enkodierten Intervallen eher „durchsetzen“ und damit häufiger in den Vergleichsprozeß einträten, da sie mit höherer Impulsfrequenz enkodiert wurden.

Zusammenfassend und abschließend soll aus obigen Betrachtungen ein Modell des Gedächtnisses für Zeitintervalle skizziert werden.

Ein modales Modell des Gedächtnisses für Zeitintervalle

Kasten 19.**Annahmen des modalen Modells des Gedächtnisses für Zeitintervalle***1 Annahmen zur Enkodierung und Gedächtnisrepräsentation von Zeitintervallen*

- 1.1 Zeitintervalle werden über eine innere Uhr enkodiert, welche aus den Komponenten: Impulssender (Schrittmacher), Schalter und Impulsaufzeichner (Akkumulator) besteht.
- 1.2 Mit Enkodierung des Zeitintervalls wird auch die Modalität des Trägersignals (des konkreten Stimulus, des konkreten Ereignisses) enkodiert.
- 1.3 Die Modalität der Enkodierung beeinflusst die Frequenz der Impulsproduktion. Die Dauer akustischer Signale wird mit höherer Frequenz enkodiert als die Dauer optischer Signale.
- 1.4 Die Repräsentation von Zeitintervallen ist mit der Modalität ihrer Enkodierung assoziiert. Es besteht also eine Verbindung zwischen der Repräsentation eines Zeitintervalls und der Repräsentation der Modalität.
- 1.5 Die Repräsentation von Zeitintervallen läßt sich auf zwei Arten beschreiben: Zum einen sind Zeitintervalle *diskret* als Werte repräsentiert. Der jeweilige Wert reflektiert den Betrag eines physikalischen Intervalls. Zum anderen sind Zeitintervalle *analog* als Prozeß repräsentiert. Die Dauer dieses internen Prozesses spiegelt die reale Dauer des Intervalls wider. Je länger das zu enkodierende Intervall, desto größer die Gedächtnisrepräsentation.

Anmerkung: Dieser Analog-diskret-Dualismus ist ein Produkt der Betrachtungsweise subjektiver Zeitintervalle. Der analoge Charakter von

subjektiver Zeit entspricht der Erfahrung von Zeit: Der Unterschied zwischen zwei Intervallen ist wiederum ein Intervall. Der diskrete Charakter subjektiver Zeit entspringt dem Bedürfnis, subjektive Zeit und interne Prozesse, mit denen subjektive Zeit verarbeitet wird, zu quantifizieren.

2 Annahmen zu Systemen der Zeitverarbeitung

- 2.1 Es existiert ein eigenständiges Gedächtnis für Zeitintervalle. Dieses ist funktional getrennt von anderen Gedächtnissystemen (wie z. B. deklaratives, prozedurales, semantisches oder episodisches Gedächtnis).
- 2.2 Es existiert nur ein einziges Langzeitgedächtnis für Zeitintervalle. In diesem befinden sich alle (relevanten) Repräsentationen von Zeitintervallen.
- 2.3 Die Akkumulation von Impulsen sowie der Vergleich zwischen zwei Zeitintervallen sind Teilprozesse des Arbeitsgedächtnisses, die zeitgleich stattfinden.
- 2.4 Die Inhalte des Arbeitsgedächtnisses befinden sich in einem hoch aktivierten Zustand.

3 Annahmen zu Aktivationsprozessen bei Zeitintervallen

- 3.1 Jede Gedächtnisrepräsentation eines Zeitintervalls hat ein bestimmtes Aktivationsniveau, unabhängig davon, ob es durch externe Quellen aktiviert wurde.

Anmerkung: Diese Annahme entspricht weitgehend der von Anderson (1983) in der ACT-Theorie formulierten Annahme bezüglich der Aktivierung des deklarativen Gedächtnisses.*

- 3.2 Damit ein Zeitintervall verarbeitet werden kann, muß es über eine bestimmte Schwelle hinaus aktiviert werden.
- 3.3 Die Gedächtnisrepräsentation eines Zeitintervalls kann durch (minde-

stens) drei Quellen aktiviert werden:

- (a) durch die aufgabenbezogene Aufmerksamkeit auf die zeitlichen Aspekte eines dargebotenen Signals;
- (b) durch die Darbietung der sprachlichen Umschreibung einer Dauer;
- (c) durch die Darbietungsmodalität eines Stimulus.

- 3.4 Je mehr Quellen an der Aktivierung beteiligt sind, desto stärker wird die interne Dauer aktiviert.

Anmerkung: Im Falle ungleicher Modalitäten zwischen dargebotenem Signal und repräsentierter Dauer kann nach (3.3) allein die aufgabenbezogene Aufmerksamkeit auf die Dauer des Signals die Repräsentation der Dauer aktivieren. Da in diesem Fall nur eine Aktivationsquelle beteiligt ist, ist die Stärke der Aktivierung der Repräsentation des Zeitintervalls entsprechend geringer als in den unimodalen Bedingungen, wo zusätzlich die Modalität als Aktivator fungiert.

- 3.5 Je höher die Repräsentation des Zeitintervalls aktiviert ist, desto schneller kann sie verarbeitet werden.

Anmerkung: Mit Verarbeitung ist hier u. a. der Vergleich der Dauer eines dargebotenen Signals mit der Repräsentation einer Dauer gemeint. Je höher also das Aktivationsniveau, desto schneller können beide Intervalle miteinander verglichen werden.

- 3.6 Je höher die Impulsrate, mit der ein Zeitintervall enkodiert wird, desto höher ist das spätere Aktivationsniveau von dessen Gedächtnisrepräsentation.

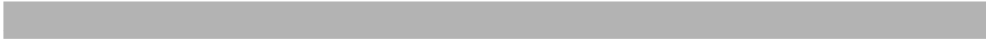
4 Annahmen zum Vergleichsprozeß

- 4.1 Der Vergleich zwischen zwei Zeitintervallen ist ein analoger Prozeß, d. h. er entfaltet sich in der (realen) Zeit. Seine Dauer hängt von der Dau-

er der zu vergleichenden Intervalle ab. Je größer die Intervalle, desto länger dauert entsprechend der Vergleich.

- 4.2 Ein Vergleich zwischen der Dauer eines dargebotenen Signals mit der Gedächtnisrepräsentation einer Dauer kann erst dann erfolgen, wenn die Gedächtnisrepräsentation über einen Schwellenwert hinaus aktiviert ist und dadurch Bestandteil des Arbeitsgedächtnisses wird.

Anmerkung: Die Akkumulation von Impulsen kann demnach erst dann erfolgen, wenn das Referenzintervall aktiviert ist und damit dem Vergleichsprozeß zur Verfügung steht. Andernfalls bleibt der Akkumulationsvorgang unterbrochen.



Abschließend soll die Verarbeitung von Zeitintervallen anhand der Abbildung 28 (auf der nächsten Seite) und unter Berücksichtigung der postulierten Annahmen beschrieben werden.

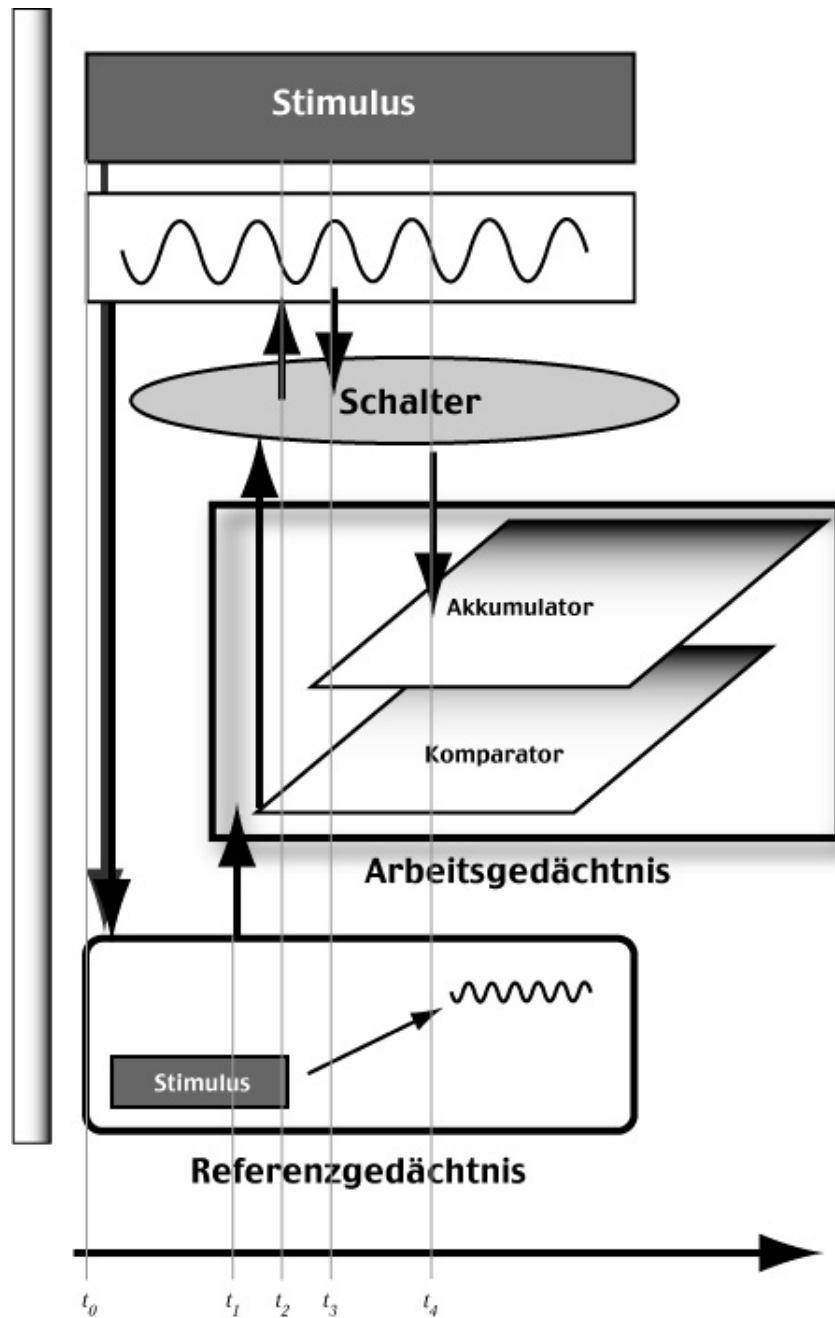


Abbildung 28. Modell der Arbeitsschritte beim Vergleich zweier Zeitintervalle (Erläuterungen im Text).

Enkodierung und Gedächtnisrepräsentation

Die für jede Zeitschätzung notwendige Vorbedingung ist die Generierung eines Bezugs- oder Referenzintervalls. Im folgenden soll dies die Standarddauer sein. Um ein mentales Abbild der Standarddauer zu erzeugen, muß zu Beginn einer Zeitschätzungsprozedur

das Intervall dargeboten werden, welches später als Referenzintervall dienen soll. Die Enkodierung der Standarddauer erfolgt nach (1.1) über die Aktivierung der inneren Uhr, welche im wesentlichen aus einem Impulssender (Schrittmacher) und einem Impulsrekorder (Akkumulator) besteht. Detaillierte Annahmen zur Funktionsweise des Schrittmachers sind an anderer Stelle ausführlich abgehandelt (z. B. Gibbon, 1991; Treisman et al., 1990). In dem hier existierenden Zusammenhang ist lediglich die Annahme von Bedeutung, daß die Enkodierungsmodalität die Frequenz des Impulsproduzenten beeinflusst. Diese ist für ein auditiv dargebotenes Signal höher als für ein visuell dargebotenes Signal (1.3). Die Impulssequenz des Schrittmachers (die als realer Prozeß zunächst ein analoges Abbild der Dauer des dargebotenen Signals darstellt) wird in ein stabiles Repräsentationsformat gebracht. Dazu wird die Impulssequenz in einen Summenwert überführt, der die Anzahl bzw. die Häufigkeit der Impulse repräsentiert. Je höher die Frequenz des Schrittmachers, desto größer der Summenwert für ein gegebenes Zeitintervall. Der Schalter hat die Funktion der Initiierung der Impulsakkumulation. Erst wenn der Schalter geschlossen ist, können Impulse akkumuliert, d. h. in ein diskretes Repräsentationsformat überführt werden. Der Akkumulator wird dem Arbeitsgedächtnis zugeordnet (2.3) und kann als eine Art Zwischenspeicher aufgefaßt werden, in dem der diskrete Wert einer enkodierten Dauer vorübergehend festgehalten wird, bis er in das Langzeitgedächtnis überführt wird. Sobald dieser diskrete Wert wieder aktiviert wird (bspw. durch Darbietung eines externen Signals), entfaltet sich die subjektive Dauer in der Zeit und materialisiert sich in einem mentalen Prozeß, dessen Dauer der zu repräsentierenden Dauer entspricht.

Ferner wird mit Enkodierung des Zeitintervalls auch die Enkodierungsmodalität selbst enkodiert (1.2). Sie bestimmt den Wahrnehmungseindruck (z. B. „Ton“, „Bild“) und wird schließlich im Langzeitgedächtnis abgebildet. Die Repräsentation der Modalität ist eng verknüpft mit der Repräsentation der Dauer, da sowohl die Modalität als auch die Dauer Attribute der sensorischen Stimulation sind (1.4). Über die Assoziation können benachbarte Repräsentationen direkt aktiviert werden. Aktivierung wird hier verstanden als kognitive „Energie“, vermittle derer bestehende Gedächtnisrepräsentationen „aktiviert“,

d. h. in einen Zustand überführt werden, der sie einer weiteren Verarbeitung zugänglich macht.

Das Repräsentationsformat der Dauer im Langzeitgedächtnis wird als diskret angenommen (1.5). Der aufsummierte Wert des Akkumulators wird dem Langzeitgedächtnis übertragen. Ob dieser Transfer ein zusätzlicher Prozeß ist oder ob die diskrete Repräsentation des Akkumulators bereits als stabil angesehen werden kann, bleibt vorerst offen. Jede Signaldarbietung führt zu einer Speicherung eines Dauerwertes im Langzeitgedächtnis, so daß nach einer Reihe von Versuchsdurchgängen eine Verteilung von Werten entsteht.

Trotz der Verbindung zwischen subjektiver Dauer und Modalität ist das Gedächtnis für Zeitintervalle funktional von anderen Gedächtnissystemen bzw. Gedächtnisinhalten getrennt (2.1). Es bildet in sich ein eigenständiges System, insofern erstens die interne Dauer eines Ereignisses unabhängig von dessen vollständiger Rekonstruktion erinnert werden kann und zweitens Dauern unterschiedlicher Ereignisse in demselben Gedächtnis abgebildet werden (*memory mixing*; 2.2).

Aktivierung der Referenzdauer und Vergleich mit dargebotener Dauer

Soll die Dauer eines externen Signals mit dem internen Standard verglichen werden, müssen sowohl das Abbild der dargebotenen Dauer als auch die Referenzdauer aktive Bestandteile des Arbeitsgedächtnis werden. Über die Reihenfolge des „Einlesens“ beider internen Dauern werden folgende Annahmen gemacht:

In der Regel beginnt eine experimentelle Prozedur mit der Darbietung des Vergleichssignals (in der Abbildung 28 Zeitpunkt t_0). Dieses aktiviert mit gewisser Latenz den Schrittmacher und das Referenzgedächtnis (Zeitpunkt t_1), was eine Produktion von Impulsen zur Folge hat. Die Geschwindigkeit, mit der die Referenzdauer dem Arbeitsgedächtnis zur Verfügung steht, richtet sich nach der Höhe der Aktivierung des Gedächtnisses (3.5). Im Falle variierender Modalitäten zwischen Trainings- und Testphase reduziert sich die Anzahl potentieller Aktivatoren (3.4), so daß die Standarddauer langsamer eingelesen wird als im

Falle übereinstimmender Modalität. Im crossmodalen Vergleich dauert das „Einlesen“ der Referenzdauer in das Arbeitsgedächtnis also länger als im unimodalen Vergleich (Zeitpunkt t_2). Erst jetzt schließt sich der Schalter (Zeitpunkt t_3), und die Impulsakkumulation kann beginnen.

Während des Vergleichsprozesses finden die Akkumulation der Dauer des dargebotenen Signals und das „Auslesen“ der internen Referenzdauer zeitgleich statt. Eine Entscheidung über den Größenunterschied beider Intervalle wird über die Diskrepanz zwischen der Dauer des Akkumulationsprozesses und der Dauer des „Auslesens“ der Referenzwertes aus dem Langzeitgedächtnis bestimmt (vgl. dazu Abbildung 26 und Erläuterungen).

Fazit und Ausblick

Das oben dargestellte modale Modell des Zeitgedächtnisses stellt eine Erweiterung derjenigen Konzeptionen dar, die innerhalb quantitativer Zeittheorien, insbesondere innerhalb der *scalar timing theory*, entwickelt worden sind. So bezieht es sich eindeutig auf z. B. Postulate zur Produktion und Akkumulation von Impulsen sowie zu bestimmten Gedächtnis- und Entscheidungsprozessen. Drei zusätzliche Annahmen werden ins Feld geführt, um eine Erklärung für die empirischen Resultate dieser Studie zu finden: (1) die Annahme einer Verbindung zwischen der Gedächtnisrepräsentation einer Dauer und der Modalität ihrer Enkodierung; (2) die Annahme von Aktivationsprozessen bezogen auf das Gedächtnis für Zeitintervalle; (3) die Annahme eines analogen Vergleichsprozesses.

Mit diesen drei Annahmen ist das Erklärungspotential quantitativer Theorien bezogen auf das Zeitgedächtnis deutlich erweitert worden. So leitet sich aus dem modalen Modell die allgemeine Vorhersage einer *Kontextabhängigkeit* von Zeitschätzungen ab, insofern eine Verschiedenheit zwischen dem Kontext, innerhalb dessen die Dauer eines Ereignis gelernt wird, und dem Kontext, in dem dieselbe Dauer erinnert wird, besteht. Mit dem Postulat der Kontextabhängigkeit weist das modale Modell in eine Richtung theoretischer Modelle, in denen Zeitschätzungen *grundsätzlich* als durch vielfältige, nichtzeitliche Faktoren be-

dingt betrachtet werden (z. B. Block, 1990; Ornstein, 1969). Somit kann das modale Modell des Zeitgedächtnisses durchaus als Baustein eines Brückenkopfes zwischen quantitativen Theorien der Dauerdiskrimination einerseits und qualitativen Theorien temporaler Verarbeitung andererseits angesehen werden.

Des weiteren liefern die Annahmen zur Assoziation zwischen der Gedächtnisrepräsentation einer Dauer und deren Enkodierungsmodalität sowie die Annahmen zu Aktivationsprozessen wichtige Hinweise für eine Architektur des Gedächtnisses für Zeitintervalle, die offenbar mehr als bislang vermutet Ähnlichkeiten mit der Architektur von Gedächtnissystemen aufweist, deren kognitiver Inhalt figurale Merkmale, Bedeutungen, Regelwissen, Sprache u. ä. sind.

Einen interessanten Ausblick für die Weiterentwicklung insbesondere der *scalar timing theory* stellt der hier postulierte analoge Vergleichsprozess dar. Wenn, wie behauptet, der Vergleich zweier Intervalle nicht die Berechnung von Wertdifferenzen (bzw. Wertquotienten) beinhaltet und damit eine Messung auf Intervallskalenniveau darstellt, sondern statt dessen nur auf Ordinalskalenniveau eine Aussage über größer und kleiner erlaubt, würde auch die Bedeutung des von Church und Gibbon (1982) eingeführten Entscheidungskriteriums *b* (dessen Variabilität als Ko-Ursache der skalaren Varianz verstanden wird) verändert und damit eine tragende Säule des skalaren Modells reinterpretiert werden müssen.

Es soll allerdings trotz aller sich eröffnenden Möglichkeiten theoretischer Um- und Neuformulierungen nicht unerwähnt bleiben, daß selbstredend jede der hier vorgestellten Zusatzannahmen den Charakter der *Vorläufigkeit* hat. Inwieweit sie zutreffend Aspekte des Zeitverarbeitungsprozesses beschreiben oder erklären können, hängt davon ab, ob sie sich in weiteren empirischen Untersuchungen bestätigen lassen.

Literatur

- Abel, S. (1972 a). Duration discrimination of noise and tone bursts. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51, 1219-1223.
- Abel, S. (1972 b). Discrimination of temporal gaps. *Journal of the Acoustical Society of America*, 52, 519-524.
- Allan, L. G. (1977). Time-order error in judgments of duration. *Canadian Journal of Psychology*, 31, 24-31.
- Allan, L. G. (1979). The perception of time. *Perception & Psychophysics*, 26, 340-354.
- Allan, L. G. (1984). Contingent aftereffects in duration judgment. In J. Gibbon & L. G. Allan (Eds.), *Timing and time perception. Annals of the New York Academy of Sciences*, 423. (pp. 116-130)
- Allan, L. G. & Kristofferson, A. B. (1974). Psychophysical theories of duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, 16, 26-34.
- Allan, L. G., Kristofferson, A. B. & Wiens, E. W. (1971). Duration discrimination of brief light flashes. *Perception & Psychophysics*, 9, 327-334.
- Allport, D. A. (1968). Phenomenal simultaneity and the perceptual moment hypothesis. *British Journal of Psychology*, 59, 365-406.
- Anderson, J. R. (1983). *The architecture of cognition*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Anderson, J. R. (1993). *Rules of the mind*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Anderson, J. R. & Bower, G. H. (1972). Recognition and retrieval processes in free recall. *Psychological Review*, 79, 97-123.
- Anderson, J. R., Reder, L. M. & Lebiere, C. (1996). Working memory: Activation limitations on retrieval. *Cognitive Psychology*, 30, 221-256.
- Aschoff, J. (1985). On the perception of time during prolonged temporal isolation. *Human Neurobiology*, 4, 41-52.
- Assmann, J. (1998). Das Doppelgesicht der Zeit im altägyptischen Denken. In J. Aschoff et al.

- (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick*, 4. Aufl. (189-223). München: Piper.
- Atkinson, R. C. & Juola, J. F. (1974). Search and decision processes in recognition memory. In D. H. Krantz, R. C. Atkinson & P. Suppes (Eds.), *Contemporary developments in mathematical psychology*. San Francisco: Freeman.
- Augustinus von Hippo (1993). Bekenntnisse, Buch XI. In K. Flasch, *Was ist Zeit? Augustinus von Hippo. Das XI. Buch der Confessiones. Historisch-philosophische Studie* (S. 229-279). Frankfurt/M.: Vittorio Klostermann.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1990). *Human Memory: Theory and Practice*. Hillsdale: Erlbaum.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 8). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1977). Recency re-examined. In S. Dornic (Ed.), *Attention and performance VI* (pp. 647-667). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bieri, P. (1972). *Zeit und Zeiterfahrung*. Frankfurt/M.: Suhrkamp Verlag.
- Bindra, D. & Waksberg, H. (1956). Methods and terminology in studies of time estimation. *Psychological Bulletin*, 53, 155-159.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R. F. (1991). *Biologische Psychologie* (2. Aufl.). Berlin: Springer.
- Blaser, J.-P. (1998). Die Zeit in der Physik. In J. Aschoff et al. (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick* (4. Aufl.), 1-15. München: Piper.
- Block, R. A. (1974). Memory and the experience of duration in retrospect. *Memory & Cognition*, 2, 153-160.
- Block, R. A. (1978). Remembered duration: Effects of event and sequence complexity. *Memory & Cognition*, 6, 320-326.
- Block, R. A. (1982). Temporal judgments and contextual change. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8, 530-544.
- Block, R. A. (1985). Contextual coding in memory: Studies of remembered duration. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 169-178). Berlin: Springer.

- Block, R. A. (1986). Remembered duration: Imagery processes and contextual encoding. *Acta Psychologica*, 62, 103-122.
- Block, R. A. (1989a). A contextualistic view of time and mind. In J. T. Fraser (Ed.), *Time and mind: Interdisciplinary issues* (pp. 61-79). Madison, CT: International Universities Press.
- Block, R. A. (1989b). Experiencing and remembering time: Affordances, context, and cognition. In I. Levin & D. Zakay (Eds.), *Time and human cognition: A life-span perspective* (pp. 333-363). Amsterdam: North-Holland.
- Block, R. A. (1990). Models of psychological time. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive Models of psychological time* (pp. 1-35). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Block, R. A. (1992). Prospective and retrospective duration judgment: The role of information processing and memory. In F. Macar, V. Pouthas, & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action and cognition: Towards bridging the gap* (pp. 141-152). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic.
- Block, R. A., George, E. J. & Reed, M. A. (1980). A watched pot sometimes boils: A study of duration experience. *Acta Psychologica*, 46, 81-94.
- Block, R. A. & Reed, M. A. (1978). Remembered duration: Evidence for a contextual-change hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4, 656-665.
- Block, R. A. & Zakay, D. (1996). Models of psychological time revisited. In H. Helfrich (Ed.), *Time and mind* (pp. 171-195). Göttingen: Hogrefe & Huber Publishers.
- Block, R. A., Zakay, D. & Hancock, P. A. (1999). Developmental changes in human duration judgments: A meta-analytic review. *Developmental Review*, 19, 183-211.
- Blough, D. S. (1965). Definition and measurement in generalization research. In D. I. Mostofsky (Ed.), *Stimulus generalization* (pp. 30-37). Stanford, California: Stanford University Press.
- Blough, D. S. (1975). Steady state data and a quantitative model of operant generalization and discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*,

104, 3-21.

- Bobko, D. J., Thompson, J. G. & Schiffman, H. R. (1977). The perception of brief temporal intervals: power functions for auditory and visual stimulus intervals. *Perception*, 6, 703-709.
- Boltz, M. G. (1991). Time estimation and attentional perspective. *Perception & Psychophysics*, 49, 422-433.
- Boltz, M. G. (1992). The remembering of auditory event duration. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 938-956.
- Boltz, M. G., Kupperman, C. & Dunne, J. (1998). The role of learning in remembered duration. *Memory & Cognition*, 26, 903-921.
- Boring, E. G. (1942). *Sensation and perception in the history of experimental psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Bortz, J. (1993). *Statistik für Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Berlin: Springer-Verlag.
- Bower, G. H. (1972). Mental imagery and associative learning. In L. W. Gregg (Ed.), *Cognition in learning and memory*. New York: Wiley.
- Brown, J. S. (1965). Generalization and discrimination. In D. I. Mostofsky (Ed.), *Stimulus generalization* (pp. 7-37). Stanford, California: Stanford University Press.
- Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing: Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, 59, 1118-1140.
- Brown, S. W. & Stubbs, D. A. (1988). The psychophysics of retrospective and prospective duration timing. *Perception*, 17, 297-310.
- Brown, S. W., Stubbs, D. A. & West, A. N. (1992). Attention, multiple timing, and psychophysical scaling of temporal judgments. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition* (pp. 129-140). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Brunner, D., Fairhurst, S., Stolovitsky, G. & Gibbon, J. (1997). Mnemonics for variability: Remembering food delay. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*

- ses, 23, 68-83.
- Brunner, D., Kacelnik, A. & Gibbon, J. (1992). Optimal foraging and timing processes in the starling, *Sturnus vulgaris*: effect of intercapture interval. *Animal Behavior*, 44, 597-613.
- Buffardi, L. (1971). Factors affecting the filled-duration illusion in the auditory, tactual, and visual modalities. *Perception & Psychophysics*, 10, 292-294.
- Burnside, W. (1971). Judgment of short time intervals while performing mathematical tasks. *Perception & Psychophysics*, 9, 404- 406.
- Cabeza de Vaca, S., Brown, B. L. & Hemmes, N. S. (1994). Internal clock and memory processes in timing. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 20, 184-198.
- Cahoon, D. & Edmonds, E. M. (1980). The watched pot still won't boil: Expectancy as a variable in estimating the passage of time. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 16, 115-116.
- Carbotte, R. M. & Kristofferson, A. B. (1973). On energy-dependent cues in duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, 14, 501-505.
- Card, S. K., Moran, T. P. & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Carlson, V. R. & Feinberg, I. (1968a). Consistency among methods of time judgment for independent groups. *Proceedings of the American Psychological Association*, 3, 83-84.
- Carlson, V. R. & Feinberg, I. (1968b). Individual variations in time judgment and the concept of an internal clock. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 631-640.
- Carlson, V. R. & Feinberg, I. (1970). Time judgment as a function of method, practice, and sex. *Journal of Experimental Psychology*, 85, 171-180.
- Casini, L., & Macar, F. (1997). Effects of attention manipulation on judgments of duration and of intensity in the visual modality. *Memory & Cognition*, 25, 812-818.
- Catania, A. C. (1970). Reinforcement schedules and psychophysical judgments: A study of some temporal properties of behavior. In W. N. Schoenfeld (Ed.), *The theory of*

- reinforcement schedules* (pp 1-42). New York: Appleton-Century-Crofts.
- Chase, W. G. & Calfee, R. C. (1969). Modality and similarity effects in short-term recognition memory. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 510-514.
- Church, R. M. (1980). Short-term memory for time intervals. *Learning and Motivation*, 11, 208-219.
- Church, R. M. (1984). Properties of the internal clock. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 424, 566-582.
- Church, R. M. (1999). Evaluation of quantitative theories of timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 253-256.
- Church, R. M. & Broadbent, H. A. (1990). Alternative representations of time, number, and rate. *Cognition*, 37, 55-81.
- Church, R. M. & Gibbon, J. (1982). Temporal generalization. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 8, 165-186.
- Church, R. M., Getty, D. J. & Lerner, N. D. (1976). Duration discrimination by rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 2, 303-312.
- Church, R. M., Meck, W. H. & Gibbon, J. (1994). Application of scalar timing theory to individual trials. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 20, 135-155.
- Clausen, J. (1950). An evaluation of experimental methods of time judgment. *Journal of Experimental Psychology*, 40, 756-761.
- Collier, G. L. & Logan, G. (2000). Modality differences in short-term memory for rhythms. *Memory & Cognition*, 28, 529-538.
- Collins, A. J. & Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic processing. *Psychological Review*, 82, 407-428.
- Collins, A. M. & Quillian, M. R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 8, 240-247.
- Conrad, C. (1972). Cognitive economy in semantic memory. *Journal of Experimental Psychology*, 92, 149-154.

- Cormier, S. M. & Hagman, J. D. (1987). *Transfer of learning. Contemporary research and applications*. San Diego: Academic Press.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104, 163-191.
- Craik, F. I. M. & Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11, 671-684.
- Creelman, C. D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 582-593.
- Cross, D. V. (1965). Metric properties of multidimensional stimulus generalization. In D. I. Mostofsky (Ed.), *Stimulus generalization* (pp. 72-93). Stanford, California: Stanford University Press.
- Crowder, R. G. (1989). Modularity and dissociations in memory systems. In H. L. Roediger & F. I. M. Craik (Eds.), *Varieties of memory and consciousness* (pp. 271-294). Hillsdale: Erlbaum.
- Crowder, R. G. & Greene, R. L. (1987). On the remembrance of times past: The irregular list technique. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116, 265-278.
- Crystal, J. D. (1999). Systematic nonlinearities in the perception of temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 25, 3-17.
- Crystal, J. D. (2001). Nonlinear time perception. *Behavioural Processes*, 55, 35-49.
- Curton, E. D. & Lordhal, D. S. (1974). Effects of attentional focus and arousal on time estimation. *Journal of Experimental Psychology*, 103, 861-867.
- Danziger, K. & Du Preez, P. D. (1963). Reliability of time estimation by the method of reproduction. *Perceptual and Motor Skills*, 16, 879-884.
- Davies, P. C. W. (1981). Time and reality. In R. Healy (Ed.), *Reduction, time, and reality: Studies in the philosophy of the natural sciences* (pp. 63-78). Cambridge: Cambridge University Press.
- De Gelder, B. & Vroomen, J. (1992). Abstract versus modality-specific memory representa-

- tions in processing auditory and visual speech. *Memory & Cognition*, 20, 533-538.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dehaene, S., Dupoux, E. & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626-641.
- Dews, P. B. (1970). The theory of fixed-interval responding. In W. N. Schoenfeld (Ed.), *The theory of reinforcement schedules* (pp. 43-61). New York: Appleton-Century-Crofts.
- Divenyi, P. L. & Danner, W. F. (1977). Discrimination of time intervals marked by brief acoustic pulses of various intensities and spectra. *Perception & Psychophysics*, 21, 125-142.
- Divenyi, P. L. & Sachs, R. M. (1978). Discrimination of time intervals bounded by tone bursts. *Perception & Psychophysics*, 24, 429-436.
- Doehring, D. G. (1961). Accuracy and consistency of time estimation by four methods of reproduction. *American Journal of Psychology*, 74, 27-35.
- Donahoe, J. W. & Burgos, J. E. (1999). Timing without a timer. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 257-263.
- Du Preez, P. D. (1963). Relation between verbal estimation and reproduction of a short time interval: preliminary study. *Perceptual and Motor Skills*, 17, 45-46.
- Eisler, H. (1975). Subjective duration and psychophysics. *Psychological Review*, 82, 429-450.
- Eisler, H. (1976). Experiments on subjective duration 1879-1975: A collection of power function exponents. *Psychological Bulletin*, 83, 185-200.
- Elliott, M. L., Geiselman, R. E. & Thomas, D. J. (1981). Modality effects in short term recognition memory. *American Journal of Psychology*, 94, 85-98.
- Engelkamp, J. (1990). *Das menschliche Gedächtnis. Das Erinnern von Sprache, Bildern und Handlungen* (2. Aufl.). Göttingen: Hogrefe.
- Engels, F. (1952). *Dialektik der Natur*. Berlin: Dietz Verlag.
- Engels, F. (1987). *Herrn Eugen Dürings Umwälzung der Wissenschaft („Anti-Dühring“)* (25. Aufl.). Berlin: Dietz Verlag.

- Estes, W. K. (1972). An associative basis for coding and organization in memory: In A. W. Melton & E. Martin (Eds.), *Coding processes in human memory* (pp. 161-190). Washington DC: V. H. Winston & Sons.
- Estes, W. K. (1980). Is human memory obsolete? *American Scientist*, 68, 62-69.
- Estes, W. K. (1982). Multiple coding and processing stages: A review. In F. Klix, J. Hofmann & E. van der Meer (Eds.), *Cognitive research in psychology* (pp. 14-21). Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Estes, W. K. (1985). Memory for temporal information. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 151-168). Berlin: Springer.
- Evans, H. L. (1971). Rat's activity: Influence of light-dark cycle, food presentation and deprivation. *Physiology & Behavior*, 7, 455-459.
- Falk, J. L. & Bindra, D. (1954). Judgment of time as a function of serial position and stress. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 279-283.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Haertel.
- Ferrara, A., Lejeune, H., & Wearden, J. H. (1997). Changing sensitivity to duration in human scalar timing: An experiment, a review, and some possible explanations. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50B, 217-237.
- Fetterman, J. G. (1995). The psychophysics of remembered duration. *Animal Learning & Behavior*, 23, 49-62.
- Fetterman, J. G. & Killeen, P. R. (1990). A componential analysis of pacemaker-counter timing systems. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 766-780.
- Fetterman, J. G. & Killeen, P. R. (1992). Time discrimination in *Columba livia* and *Homo sapiens*. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 18, 80-94.
- Filer, R. J. & Meals, D. W. (1949). The effect of motivating conditions on the estimation of time. *Journal of Experimental Psychology*, 39, 327-337.
- Flagg, S. F., Medin, D. L. & Davis, R. T. (1974). Stimulus generalization in monkeys following discrimination training with grey stimuli. *Animal Learning and Behavior*, 2, 19-22.

- Flexser, A. J. & Tulving, E. (1978). Retrieval independence in recognition and recall. *Psychological Review*, 85, 153-172.
- Fortin, C. & Rousseau, R. (1987). Time estimation as an index of processing demand in memory search. *Perception & Psychophysics*, 42, 377-382.
- Fortin, C. & Rousseau, R. (1998). Interference from short-term memory processing on encoding and reproducing brief durations. *Psychological Research*, 61, 269-276.
- Fortin, C. & Massé, N. (2000). Expecting a break in time estimation: Attentional time-sharing without concurrent processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1788-1796.
- Fraisse, P. (1966). *Praktikum der experimentellen Psychologie* (2. Aufl.). Bern: Hans Huber.
- Fraisse, P. (1978). Time and rhythm perception. In E. Carterette & M. Friedman (Eds.), *Handbook of perception* (Vol. 8, pp. 203-254). New York: Academic Press.
- Fraisse, P. (1985). *Psychologie der Zeit*. München: Ernst Reinhardt Verlag.
- Fraisse, P. Bonnet, C., Gelly, N. & Michaut, G. (1962). Vergleich der Zeitschätzungsmethoden. *Zeitschrift für Psychologie*, 167, 268-277.
- Frankenhaeuser, M. (1959). *Estimation of time. An experimental study*. Stockholm: Almqvist et Wiksell.
- Freericks, R. (1996). Zeitkompetenz. Zur Perspektiverweiterung der Freizeitpädagogik. *Gruppendynamik*, 27, 11-20.
- Freyd, J. J. (1987). Dynamic mental representations. *Psychological Review*, 94, 427-438.
- Freyd, J. J. (1992). Dynamic representations guiding adaptive behavior. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action and cognition* (pp. 309-323). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Friberg, A. & Sundberg, J. (1995). Time discrimination in a monotonic, isochronic sequence. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 2524-2531.
- Gallistel, C. R. & Gibbon, J. (2000). Time, rate, and conditioning. *Psychological Review*, 107, 289-344.
- Ganz, L. (1965). The partial dissociation of discrimination and generalization. In D. I. Mo-

- stofsky (Ed.), *Stimulus generalization* (pp. 111-118). Stanford, California: Stanford University Press.
- Geißler, H.-G. (1987). The temporal architecture of central information processing: evidence for a tentative time-quantum model. *Psychological Research*, 49, 99-106.
- Geißler, H.-G. (1992). New magic numbers in mental activity? On a taxonomic system for critical time periods. In H.-G. Geißler, S. W. Link & J. T. Townsend (Eds.), *Cognition, information processing and psychophysics* (pp. 293-322). Hillsdale: Erlbaum Associates.
- Geißler, H.-G. (1995). Über Möglichkeiten diskret-ganzzahliger Strukturierung in Wahrnehmung und Gedächtnis: Betrachtungen in Sachen „Zeitquanten“. In D. Dörner & E. van der Meer (Hrsg.), *Das Gedächtnis. Probleme – Trends – Perspektiven* (19-52). Göttingen: Hogrefe.
- Geißler, H.-G. (2000). Zeitverarbeitung – Verarbeitungszeit: Temporale Invarianten und oscillatorische Mechanismen in Wahrnehmung und Gedächtnis. *Zeitschrift für Psychologie*, 208, 129-168.
- Getty, D. J. (1975). Discrimination of short temporal intervals: A comparison of two models. *Perception & Psychophysics*, 18, 1-8.
- Gibbon, J. (1971). Scalar timing and semi-Markov chains in free-operant avoidance. *Journal of Mathematical Psychology*, 8, 109-138.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's Law in animal timing. *Psychological Review*, 79, 68-92.
- Gibbon, J. (1991). Origins of scalar timing. *Learning and Motivation*, 22, 3-38.
- Gibbon, J. (1992). Ubiquity of scalar timing with a Poisson clock. *Journal of Mathematical Psychology*, 36, 283-293.
- Gibbon, J. & Church, R. M. (1984). Sources of variance in information processing models of timing. In H. L. Roitblat, T. G. Bever & H. S. Terrace (Eds.), *Animal cognition* (pp. 465-488). Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gibbon, J. & Church, R. M. (1990). Representation of time. *Cognition*, 37, 23-54.

- Gibbon, J., Church, R. M. & Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. In J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Timing and time perception* (423, pp. 52-77). New York: New York Academy of Sciences.
- Gibson, J. J. (1975). Events are perceivable but time is not. In J. T. Fraser & N. Lawrence (Eds.), *The study of time II* (pp. 295-301). New York: Springer-Verlag.
- Gigerenzer, G. (1981). *Messung und Modellbildung in der Psychologie*. München: Reinhardt (UTB).
- Gillund, G. & Shiffrin, R. M. (1984). A retrieval model for both recognition and recall. *Psychological Review*, 91, 1-67.
- Glenberg, A. M., Mann, S., Altman, L., Forman, T. & Procise, S. (1989). Modality effects in the coding and reproduction of rhythms. *Memory & Cognition*, 17, 373-383.
- Godden, D. & Baddeley, A. D. (1975). Context-dependent memory in two natural environments: On land and under water. *British Journal of Psychology*, 66, 325-331.
- Goldfarb, J. L. & Goldstone, S. (1963). Proprioceptive involvement, psychophysical method and temporal judgment. *Perceptual and Motor Skills*, 17, 286.
- Goldstone, S. (1968a). Production and reproduction of duration: Intersensory comparisons. *Perceptual and Motor Skills*, 26, 755-760.
- Goldstone, S. (1968b). Reaction time to onset and termination of lights and sounds. *Perceptual and Motor Skills*, 27, 1023-1029.
- Goldstone, S. & Goldfarb, J. L. (1964). Auditory and visual time judgment. *The Journal of General Psychology*, 70, 369-387.
- Goldstone, S. & Lhamon, W. T. (1971). Levels of cognitive functioning and the auditory-visual differences in human timing behavior. In M. H. Appley (Ed.), *Adaptation level theory (symposium)* (pp. 263-280). New York: Academic Press.
- Goldstone, S. & Lhamon, W. T. (1974). Studies of auditory-visual differences in human time judgment: 1. Sounds are judged longer than lights. *Perceptual and Motor Skills*, 39, 63-82.
- Götz, K. & Lackner, C. (1996). „Zeit“ und Führung – „Zeit“ und Organisation. *Organisations-*

entwicklung, 2, 17-28.

Grant, D. S. & Kelly, R. (1996). The role of sample discriminability and minimum wait time in the coding of event duration in pigeons. *Learning and Motivation*, 27, 243-259.

Grant, D. S. & Robinson, T. C. (1993). Cross-stimulus transfer of timing in pigeons. *Animal Learning & Behavior*, 21, 106-112.

Grant, D. S. & Spetch, M. L. (1991). Pigeons' memory for event duration: Differences between choice and successive matching tasks. *Learning and Motivation*, 22, 180-190.

Grant, D. S., Spetch, M. L. & Kelly, R. (1997). Pigeons' coding of event duration in delayed matching-to-sample. In C. M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and Behaviour: Psychological and Neurobehavioural Analyses* (pp. 217-264). Amsterdam: Elsevier.

Grondin, S. (1993). Duration discrimination of empty and filled intervals marked by auditory and visual signals. *Perception & Psychophysics*, 54, 383-394.

Grondin, S. (2001). From physical time to the first and second moments of psychological time. *Psychological Bulletin*, 127, 22-44.

Grondin, S., Ivry, R. B., Franz, E., Perreault, L. & Metthé, L. (1996). Markers' influence on the duration discrimination of intermodal intervals. *Perception & Psychophysics*, 58, 424-433.

Grondin, S., Meilleur-Wells, G., Ouellette, C. & Macar, F. (1998). Sensory effects on judgments of short time-intervals. *Psychological Research*, 61, 261-268.

Grondin, S. & Rousseau, R. (1991). Judging the relative duration of multimodal short empty time intervals. *Perception & Psychophysics*, 49, 245-256.

Grube, D. (1998). Die Kapazität des phonetischen Speichers des Arbeitsgedächtnisses als „auditive Präsenzzeit“ und ihr Einfluß auf die Reproduktion von Zeitmustern. In U. Kotkamp & W. Krause (Hrsg.), *Intelligente Informationsverarbeitung* (S. 223-231). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.

Grüsser, O.-J. (1998). Zeit und Gehirn. Zeitliche Aspekte der Signalverarbeitung in den Sinnesorganen und im Zentralnervensystem. In J. Aschoff et al. (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick* (4. Aufl., S. 79-132). München: Serie Piper.

- Guay, M. (1982). Long-term retention of temporal information. *Perceptual and Motor Skills*, 54, 843-849.
- Guay, M. & Wilberg, R. B. (1983). Short-term retention of temporal information under a mental counting cognitive strategy. *Perceptual and Motor Skills*, 56, 415-420.
- Gulliksen, H. (1927). The influence of occupation upon the perception of time. *Journal of Experimental Psychology*, 10, 52-59.
- Guttman, N. & Kalish, H. I. (1956). Discriminability and stimulus generalization. *Journal of Experimental Psychology*, 51, 79-88.
- Guyau, J.-M. (1890). La genèse de l'idée de temps. Paris: Félix Alcan. Englische Übersetzung unter dem Titel „The origin of the idea of time“ von J. A. Michon, V. Pouthas & C. Greenbaum in J. A. Michon, V. Pouthas & J. L. Jackson (1988), *Guyau and the idea of time* (pp. 93-159). Amsterdam: KNAW/North-Holland-Elsevier.
- Hager, W. (1987). Grundlagen einer Versuchsplanung zur Prüfung empirischer Hypothesen in der Psychologie. In G. Lüer (Hrsg.), *Allgemeine experimentelle Psychologie* (S. 43-264). Stuttgart: G. Fischer.
- Hager, W. (1992). Eine Strategie zur Entscheidung über psychologische Hypothesen. *Psychologische Rundschau*, 43, 18-29.
- Hager, W. & Spies, K. (1991). *Versuchsdurchführung und Versuchsbericht. Ein Leitfaden*. Göttingen: Hogrefe.
- Hanson, H. M. (1959). Effects of discrimination training on stimulus generalization. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 321-334.
- Hasher, L. & Zacks, R. T. (1979). Automatic and effortful processes in memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108, 356-388.
- Hawkes, G. R., Bailey, R. W. & Warm, S. S. (1961). Method and modality in judgments of brief stimulus duration. *Journal of Auditory Research*, 39, 345-388.
- Hébert, J. A. (1973). Adaptation-level and theory of signal detection: An examination and integration of two judgment models for voluntary stimulus generalization. *Acta Psychologica*, 37, 15-29.

- Heinemann, E. G., Avin, E., Sullivan, M. A. & Chase, S. (1969). Analysis of stimulus generalization with a psychophysical method. *Journal of Experimental Psychology*, 80, 215-224.
- Heinemann, E. G. & Chase, S. (1975). Stimulus generalization. In W. K. Estes (Ed.), *Handbook of learning and cognitive processes. Volume 2. Conditioning and behavior theory* (pp. 305-349). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Hellström, A. (1977). Time-errors are perceptual. *Psychological Research*, 39, 345-388.
- Herrmann, T. (1988). Mentale Repräsentation – ein erläuterungsbedürftiger Begriff. *Sprache & Kognition*, 7, 162-176.
- Hicks, R. E., Miller, G. W., Gaes, G. & Bierman, K. (1977). Concurrent processing demands and the experience of time-in-passing. *American Journal of Psychology*, 90, 431-446.
- Hicks, R. E., Miller, G. W. & Kinsbourne, M. (1976). Prospective and retrospective judgments of time as a function of amount of information processed. *American Journal of Psychology*, 89, 719-730.
- Hinton, S. C., & Meck, W. H. (1997). How time flies: Functional and neural mechanisms of interval timing. In C. M. Bradshaw & E. Szabadi (Eds.), *Time and behaviour: Psychological and neurobehavioural analyses* (pp. 409-457). Amsterdam: Elsevier.
- Hintzman, D. L., Summers, J. J. & Block, R. A. (1975). Spacing judgments as an index of study-phase retrieval. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 104, 31-40.
- Hirsh, I. J., Bilger, R. C. & Deatherage, B. H. (1956). The effect of auditory and visual background on apparent duration. *The American Journal of Psychology*, 69, 561-574.
- Hirsh, K. A. (1979). Signal detection analysis of conditioning data. *The Journal of General Psychology*, 101, 249-258.
- Hoagland, H. (1933). The physiological control of judgments of duration: Evidence for a chemical clock. *Journal of General Psychology*, 9, 267-287.
- Hocherman, S. & Ben-Dov, G. (1979). Modality-specific effects on discrimination of short empty time intervals. *Perceptual and Motor Skills*, 48, 807-814.

- Hoffmann, J. (1986). *Die Welt der Begriffe*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Holzkamp, K. (1978). *Gesellschaftlichkeit des Individuums. Aufsätze 1974-1977*. Köln: Pahl-Rugenstein.
- Hornstein, A. D. & Rotter, G. S. (1969). Research methodology in temporal perception. *Journal of Experimental Psychology*, 79, 561-564.
- Hovland, C. I. (1937). The generalization of conditioned responses: I. The sensory generalization of conditioned responses with varying frequencies of tone. *Journal of General Psychology*, 17, 125-148.
- Hull, C. L. (1943). *Principles of behavior*. New York: D. Appleton-Century.
- Husserl, E. (1980). *Vorlesungen zur Phänomenologie des inneren Zeitbewußtseins* (2. Aufl., herausgegeben von M. Heidegger). Tübingen: Max Niemayer Verlag.
- Jackson, J. L. (1985). Is the processing of temporal information automatic or controlled? In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind and behavior* (pp. 179-190). Berlin: Springer.
- Jackson, J. L. & Michon, J. A. (1992). Verisimilar and metaphorical representations of time. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition* (pp. 349-360). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Jacoby, L. L. & Craik, F. I. M. (1979). Effects of elaboration of processing at encoding and retrieval: Trace distinctiveness and recovery of initial context. In L. S. Cermak & F. I. M. Craik (Eds.), *Levels of processing in human memory* (pp. 1-21). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Jacoby, L. L. & Dallas, M. (1981). On the relationship between autobiographical memory and perceptual learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 110, 306-340.
- Jamieson, D. G. (1977). Two presentation order effects. *Canadian Journal of Psychology*, 31, 184-194.
- Jamieson, D. G. & Petrusic, W. M. (1975a). Presentation order effects in duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, 17, 197-202.
- Jamieson, D. G. & Petrusic, W. M. (1975b). The dependence of time-order error direction on

- stimulus range. *Canadian Journal of Psychology*, 29, 175-182.
- Jamieson, D. G. & Petrusic, W. M. (1976). On a bias induced by the provision of feedback in psychophysical experiments. *Acta Psychologica*, 40, 199-206.
- Jamieson, D. G. & Petrusic, W. M. (1978). Feedback versus an illusion in time. *Perception*, 7, 91-96.
- Jenkins, H. M. & Harrison, R. H. (1960). Effect of discrimination training on auditory generalization. *Journal of Experimental Psychology*, 59, 246-253.
- Johnston, W. A., Dark, V. J. & Jacoby, L. L. (1985). Perceptual fluency and recognition judgements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, 11, 3-11.
- Johnston, W. A. & Heinz, S. P. (1978). Flexibility and capacity demands of attention. *Journal of Experimental Psychology: General*, 107, 420-435.
- Kahnemann, D. (1973). *Attentional effort*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall.
- Kant, I. (1956). Kritik der reinen Vernunft. Erster Teil. In W. Weischedel (Hrsg.), *Immanuel Kant. Werke in zehn Bänden. Band 3*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Kato, H. & Tsuzaki, M. (1994). Intensity effect on discrimination of auditory duration flanked by preceding and succeeding tones. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 15, 349-351.
- Kempen, G. & Huibers, P. (1983). The lexicalization process in sentence production and naming: indirect election of words. *Cognition*, 14, 185-209.
- Killeen, P. R. (1999). Modeling modeling. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 275-280.
- Killeen, P. R. & Weiss, N. A. (1987). Optimal timing and the Weber function. *Psychological Review*, 94, 455-468.
- Killeen, P. R. & Fetterman, J. G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review*, 95, 274-295.
- Kintsch, W. & van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85, 363-394.

- Klaus, G. (1967). *Wörterbuch der Kybernetik*. Berlin: Dietz Verlag.
- Klimesch, W. (1988). *Struktur und Aktivierung des Gedächtnisses. Das Vernetzungsmodell: Grundlagen und Elemente einer übergreifenden Theorie*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Klix, F. (1973). *Information und Verhalten. Kybernetische Aspekte der organismischen Informationsverarbeitung. Einführung in naturwissenschaftliche Grundlagen der Allgemeinen Psychologie*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Klix, F. (1984). Über Wissensrepräsentationen im menschlichen Gedächtnis. In F. Klix (Hrsg.), *Gedächtnis, Wissen, Wissensnutzung*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Kompaß, R. & Geißler, H.-G. (2001). Quantal timing: An investigation of gamma apparent motion. In E. Sommerfeld, R. Kompaß & T. Lachmann (Eds.), *Fechner Day 2001* (pp. 462-467). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Kosslyn, S. M. (1980). *Image and Mind*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Kraemer, P. J., Mazmanian, D. S. & Roberts, W. A. (1985). The choose-short effect in pigeon memory for stimulus duration: Subjective shortening versus coding models. *Animal Learning & Behavior*, 13, 349-354.
- Kraemer, P. J., Randall, C. K. & Brown, R. W. (1997). The influence of stimulus attributes on duration matching-to-sample in pigeons. *Animal Learning & Behavior*, 25, 148-157.
- Kristofferson, A. B. (1967). Attention and psychophysical time. *Acta Psychologica*, 27, 93-100.
- Kristofferson, A. B. (1977). A real-time criterion theory of duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, 21, 105-117.
- Kristofferson, A. B. (1980). A quantal step function in duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, 27, 300-306.
- Kristofferson, A. B. (1984). Quantal and deterministic timing in human duration discrimination. In J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Annals of the New York Academy of Sciences: Vol. 423. Timing and time perception* (pp. 3-15). New York: New York Academy of Sciences.
- Kristofferson, A. B. (1990). Timing mechanisms and the threshold for duration. In H.-G. Geißler, M. H. Müller & W. Prinz (Eds.), *Psychophysical explorations of mental structures* (pp.

- 268-277). Göttingen: Hogrefe & Huber Publishers.
- Latour, P. L. (1967). Evidence of internal clocks in the human operator. *Acta Psychologica*, 27, 93-100; 341-348.
- Leak, T. M. & Gibbon, J. (1995). Simultaneous timing of multiple intervals: Implications of the scalar property. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 21, 3-19.
- Lee, C. L. & Estes, W. K. (1981). Item and order information in short-term memory: Evidence for multi-level perturbation processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 7, 149-169.
- Lejeune, H. (1998). Switching or gating? The attentional challenge in cognitive models of psychological time. *Behavioural Processes*, 44, 127-145.
- Lejeune, H. & Wearden, J. H. (1991). The comparative psychology of fixed-interval responding: some quantitative analyses. *Learning and Motivation*, 22, 84-111.
- Lenin, W. I. (1977). *Materialismus und Empirio-kritizismus. Kritische Bemerkungen über eine reaktionäre Philosophie* (14. Aufl.). Berlin: Dietz Verlag.
- Levelt, W. J. M. (1989). *Speaking: From intention to articulation*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Lichtenstein, M. (1961). Phenomenal simultaneity with irregular timing of components of the visual stimulus. *Perceptual and Motor Skills*, 12, 47-60.
- Livingstone, M. S. (1988). Kunst, Schein und Wahrnehmung. *Spektrum der Wissenschaft*, 3, 114-121.
- Lockhart, J. M. (1967). Ambient temperature and time estimation. *Journal of Experimental Psychology*, 73, 286-291.
- Macar, F. (1996). Temporal judgments on intervals containing stimuli of varying quantity, complexity and periodicity. *Acta Psychologica*, 92, 297-308.
- Macar, F., Grondin, S. & Casini, L. (1994). Controlled attention sharing influences time estimation. *Memory & Cognition*, 22, 673-686.
- Mach, E. (1897). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* (3. Aufl.). Leipzig: Brockhaus.

- Macmillan, N. A. & Creelman, C. D. (1991). *Detection theory: a user's guide*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mandler, G. (1980). Recognizing: The judgement of previous occurrence. *Psychological Review*, 87, 252-271.
- Mandler, J. M. & Johnson, N. S. (1977). Remembrance of things parsed: Story structure and recall. *Cognitive Psychology*, 9, 111-151.
- Maricq, A. V., Roberts, S. & Church, R. M. (1981). Methamphetamine and time estimation. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7, 18-30.
- Mattes, S. & Ulrich, R. (1998). Directed attention prolongs the perceived duration of a brief stimulus. *Perception & Psychophysics*, 60, 1305-1317.
- McClain, L. (1983). Interval estimation: Effect of processing demands on prospective and retrospective reports. *Perception & Psychophysics*, 34, 185-189.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* (Vol. 2). Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44, 107-158.
- McCormack, T., Brown, G. D. A., Maylor, E. A., Darby, R. J. & Green, D. (1999). Developmental changes in time estimation: Comparing childhood and old age. *Developmental Psychology*, 35, 1143-1155.
- McEwan, D. & Killeen, P. (1991). The effects of rate and amount of reinforcement on the speed of the pacemaker in pigeons' timing behavior. *Animal Learning & Behavior*, 19, 164-170.
- McGavren, M. (1965). Memory of brief auditory durations in comparison discriminations. *Psychological Record*, 15, 249-260.
- McReynolds, P. (1953). Thinking conceptualised in terms of interacting moments. *Psychological Review*, 60, 319-330.
- McTaggart, J. M. E. (1993). The unreality of time. In R. le Poidevin & M. MacBeath (Eds.), *The philosophy of time* (pp. 23-34). Oxford: Oxford University Press.

- Meck, W. H. (1983). Selective adjustment of the speed of internal clock and memory processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9, 171-201.
- Meck, W. H. (1991). Modality-specific circadian rhythmicities influence mechanisms of attention and memory for interval timing. *Learning and Motivation*, 22, 153-179.
- Meck, W. H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive Brain Research*, 3, 227-242.
- Meck, W. H. (1997). Application of a mode-control model of temporal integration to counting and timing behavior. In C. M. Bradshaw & E. Szabadi (eds.), *Time and Behaviour: Psychological and Neurobehavioural Analyses*, 133-184. Amsterdam: Elsevier.
- Meck, W. H. & Church, R. M. (1982). Abstraction of temporal attributes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 8, 226-243.
- Meck, W. H. & Church, R. M. (1983). A mode control model of counting and timing processes. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9, 320-334.
- Meck, W. H., Church, R. M. & Gibbon, J. (1985). Temporal integration in duration and number discrimination. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 11, 591-597.
- Meredith, L. S. & Wilsoncroft, W. E. (1989). Time perception: Effects of sensory modality, ambient illumination and intervals. *Perceptual and Motor Skills*, 68, 373-374.
- Meyer, D. E. & Schvaneveldt, R. W. (1971). Facilitation in recognizing pairs of words: evidence of a dependence between retrieval operations. *Journal of Experimental Psychology*, 90, 227-234.
- Miall, C. (1989). The storage of time intervals using oscillating neurons. *Neural Computation*, 1, 359-371.
- Miall, C. (1992). Oscillators, predictions and time. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition* (pp. 215-227). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Michon, J. A. (1985a). The compleat time experimenter. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 20-52). Berlin: Springer.

- Michon, J. A. (1985b). Temporality and metaphor. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 288-296). Berlin: Springer.
- Michon, J. A. (1992). Representing time. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition* (pp. 303-307). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Michon, J. A. & Jackson, J. L. (1984). Attentional effort and cognitive Strategies in the processing of temporal information. In J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Timing and time perception* (Vol. 423, pp. 298-321). New York: New York Academy of Sciences.
- Minsky, M. L. (1975). A framework for representing knowledge. In P. H. Winston (Ed.), *The psychology of computer vision* (pp. 211-277). New York: McGraw Hill.
- Montangero, J. (1985). The development of temporal inferences and meanings in 5- to 8-year old children. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 279-287). Berlin: Springer.
- Moore, J. W. & Choi, J. (1998). Conditioned stimuli are occasion setters. In N. A. Schmajuk & P. C. Holland (Eds.), *Occasion setting: Associative Learning and cognition in animals* (pp. 279-318). Washington, DC: American Psychological Association.
- Neimark, E. D. & Estes, W. K. (1967). *Stimulus sampling theory*. San Francisco: Holden-Day.
- Nelson, D. L. (1979). Remembering pictures and words: Appearance, significance and name. In L. Cermak & F. I. M. Craik (Eds.), *Levels of processing in human memory* (pp. 45-76). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Nelson, D. L., Reed, V. S. & Walling, J. R. (1976). Pictorial superiority effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 2, 523-528.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- Nilsson, T. H. (1969). Two-pulse interval vision thresholds. *Journal of the Optical Society of America*, 59, 753-756.
- Ornstein, R. (1969). *On the experience of time*. Baltimore: Penguin Books.
- Paivio, A. (1969). Mental imagery in associative learning and memory. *Psychological Review*,

70, 241-263.

Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehard & Winston.

Paivio, A. (1986). *Mental representations. A dual coding approach*. New York: Oxford University Press.

Park, D. (1985). Brain time and mind time. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Eds.), *Time, mind, and behavior* (pp. 53-64). Berlin: Springer.

Pearson, K. (1900). *The grammar of science* (2. edition). London: Black.

Penner, M. (1976). The effect of marker variability on the discrimination of temporal intervals. *Perception & Psychophysics*, 19, 466-469.

Penney, T. B., Allan, L. G., Meck, W. H. & Gibbon, J. (1998). Memory mixing in duration bisection. In D. A. Rosenbaum, & C. E. Collyer (Eds.), *Timing of behavior: Neural, computational, and psychological perspectives* (pp. 165-193). Cambridge, MA: MIT Press.

Penney, T. B., Gibbon, J. & Meck, W. H. (2000). Differential effects of auditory and visual signals on clock speed and temporal memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1770-1787.

Penton-Voak, I. S., Edwards, H., Percival, A. & Wearden, J. H. (1996). Speeding up an internal clock in humans? Effects on click trains on subjective duration. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 22, 307-320.

Plattner, I. (1990). *Zeitbewußtsein und Lebensgeschichte*. Heidelberg: Roland Asanger Verlag.

Pöldinger, W. (1971). *Kompendium der Psychopharmakotherapie*. Grenzach/Baden: Hoffmann-La Roche A. G.

Pöppel, E. (1998). Erlebte Zeit und die Zeit überhaupt: Ein Versuch der Integration. In J. Aschoff et al. (Hrsg.), *Die Zeit. Dauer und Augenblick* (4. Aufl.) (369-382). München: Piper.

Poynter, D. (1989). Judging the duration of time intervals: A process of remembering segments of experience. In I. Levin & D. Zakay (Eds.), *Time and human cognition. A life-span perspective* (305-331). Amsterdam: Elsevier.

- Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: a critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, 80, 1-24.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). The rate of "mental rotation" of images: a test of a holistic analogue hypothesis. *Memory and Cognition*, 7, 19-28.
- Rakitin, B. C., Gibbon, J., Penney, T. B., Malapani, C., Hinton, S. C. & Meck, W. H. (1998). Scalar expectancy theory and peak-interval timing in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 24, 15-33.
- Rammsayer, T. H. & Leutner, D. (1996). Temporal discrimination as a function of marker duration. *Perception & Psychophysics*, 58, 1213-1223.
- Rammsayer, T. H. & Lima, S. D. (1991). Duration discrimination of filled and empty auditory intervals: Cognitive and perceptual factors. *Perception & Psychophysics*, 50, 565-574.
- Rammsayer, T. H. & Skrandies, W. (1998). Stimulus characteristics and temporal information processing: Psychophysical and electrophysiological data. *Journal of Psychophysiology*, 12, 1-12.
- Richie, D. M. & Bickhard, M. H. (1988). The ability to perceive duration: its relation to the development of the logical concept of time. *Developmental Psychology*, 24, 318-323.
- Ripps, L. J., Shoben, E. J. & Smith, E. E. (1973). Semantic distance and the verification of semantic relations. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 12, 1-20.
- Roelofs, C. O. & Zeeman, W. (1951). Influence of different sequences of optical stimuli on the estimation of duration of a given interval of time. *Acta Psychologica*, 8, 89-128.
- Rousseau, L. & Rousseau, R. (1996). Stop-reaction time and the internal clock. *Perception & Psychophysics*, 58, 434-448.
- Rubinstein, S. L. (1962). *Sein und Bewußtsein. Die Stellung des Psychischen im allgemeinen Zusammenhang der Erscheinungen in der materiellen Welt*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* (Vol. 1). Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
- Schab, F. R. & Crowder, R. G. (1989). Accuracy of temporal coding: auditory-visual

- comparisons. *Memory & Cognition*, 17, 384-397.
- Schank, R. C. & Abelson, R. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Schiffman, H. R. & Bobko, D. J. (1974). Effects of stimulus complexity on the perception of brief temporal intervals. *Journal of Experimental Psychology*, 103, 156-159.
- Schmidt, R. (1996). Die Struktur der Gedächtnisspur. In D. Albert & K.-H. Stapf (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C (Theorie und Forschung). Serie II (Kognition). Band 4 (Gedächtnis)* (S. 181-260). Göttingen: Hogrefe.
- Schneider, W. & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing I: detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Sebel, A. J. & Wilsoncroft, W. E. (1983). Auditory and visual differences in time perception. *Perceptual and Motor Skills*, 57, 295-300.
- Segal, S. J. & Fusella, V. (1971). Effect of images in six sense modalities on detection of visual signal from noise. *Psychonomic Science*, 24, 55-56.
- Seiwert, L. J. (1995). *Das neue 1 x 1 des Zeitmanagements* (17. Aufl.). Offenbach: Gabal.
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Sherry, D. F. & Schacter, D. L. (1987). The evolution of multiple memory systems. *Psychological Review*, 94, 439-454.
- Spence, K. W. (1937). The differential response in animals to stimuli varying within a single dimension. *Psychological Review*, 44, 430-444.
- Singley, M. K. & Anderson, J. R. (1989). *The transfer of cognitive skill*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Spetch, M. L. (1987). Systematic errors in pigeons' memory for event duration: Interactions between training and test delay. *Animal Learning and Behavior*, 15, 1-5.
- Spetch, M. L. & Grant, D. S. (1993). Pigeons' memory for event duration in choice and successive matching-to-sample tasks. *Learning and Motivation*, 24, 156-174.
- Spetch, M. L. & Rusak, B. (1989). Pigeons' memory for event duration: Intertrial interval and

- delay effects. *Animal Learning and Behavior*, 17, 147-156.
- Spetch, M. L. & Wilkie, D. M. (1982). A systematic bias in pigeons' memory for food and light durations. *Behavior Analysis Letters*, 2, 267-274.
- Spetch, M. L. & Wilkie, D. M. (1983). Subjective shortening: A model of pigeons' memory for event duration. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 9, 14-30.
- Staddon, J. E. R. & Higa, J. J. (1999). Time and memory: towards a pacemaker-free theory of interval timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 71, 215-251.
- Sternberg, S. (1966). High speed scanning in human memory. *Science*, 153, 652-654.
- Sternberg, S. (1969). Memory scanning: Mental processes revealed by reaction time experiment. *American Science*, 57, 421-457.
- Stubbs, D. A., Dreyfus, L. R. & Fetterman, J. G. (1984). The perception of temporal events. In J. Gibbon & L. Allan (Eds.), *Timing and time perception. Annals of the New York Academy of Sciences*, 423, 30-42.
- Stein, W. (1928). Tachistoskopische Untersuchungen über das Lesen. *Archiv für die gesamte Psychologie*, 64, 301-346.
- Steiner, G. (1988). Analoge Repräsentationen. In H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie* (S. 99-119). München: PVU.
- Stevens, S. S. (1957). On the psychological law. *Psychological Review*, 64, 153-181.
- Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural and social prospects*. New York: Wiley.
- Stroud, J. M. (1955). The fine structure of psychological time. In H. Quastler (Ed.), *Information theory in psychology* (pp. 174-207). Glencoe, Ill.: Free Press.
- Sutton, R. S. & Barto, A. G. (1981). Toward a modern theory of adaptive networks: Expectation and prediction. *Psychological Review*, 88, 135-170.
- Szamosi, G. (1992). The short life of metric time. In F. Macar, V. Pouthas & W. J. Friedman (Eds.), *Time, action, and cognition* (pp. 361-369). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- Thomas, D. R. & King, R. A. (1959). Stimulus generalization as a function of level of motivation. *Journal of Experimental Psychology*, 57, 323-328.
- Thomas, E. A. C. & Brown, I. (1974). Time perception and the filled-duration illusion. *Perception & Psychophysics*, 16, 449-458.
- Thomas, E. A. C. & Weaver, W. B. (1975). Cognitive processing and time perception. *Perception & Psychophysics*, 17, 363-367.
- Thomson, D. M., Robertson, S. L. & Vogt, R. (1982). Person recognition: The effect of context. *Human Learning*, 1, 137-154.
- Thor, D. H. (1962). Diurnal variability in time estimation. *Perceptual and Motor Skills*, 15, 451-454.
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock". *Psychological Monographs*, 77, 1-31.
- Treisman, M. (1993). On the structure of the temporal sensory system. *Psychologica Belgica*, 33, 271-293.
- Treisman, M. & Brogan, D. (1992). Time perception and the internal clock: Effects of visual flicker on the temporal oscillator. *European Journal of Cognitive Psychology*, 4, 41-70.
- Treisman, M., Cook, N., Naish, P. L. N. & MacCrone, J. K. (1994). The internal clock: Electroencephalographic evidence for oscillatory processes underlying time perception. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 47A, 241-289.
- Treisman, M., Faulkner, A., Naish, P. L. N. & Brogan, D. (1990). The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency. *Perception*, 19, 705-743.
- Tulving, E. & Osler, S. (1968). Effectiveness of retrieval cues in memory for words. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 593-601.
- Tulving, E. & Thomson, D. M. (1971). Retrieval processes in recognition memory: Effects of associative context. *Journal of Experimental Psychology*, 87, 116-124.
- Tulving, E. & Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80, 352-373.

- Vanagas, V., Balkelite, O., Batusyavitchus, E. & Kiryalis, D. (1976). The quantal character of recognition processes. In V. D. Glezer (Ed.), *Information processing in the visual system* (pp. 25-30). Leningrad: Academy of the USSR.
- Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. Tübingen: H. Laupp.
- Warm, J. S., Stutz, R. M. & Vassolo, P. A. (1975). Intermodal transfer in temporal discrimination. *Perception & Psychophysics*, 18, 281-286.
- Watkins, M. J. & Tulving, E. (1975). Episodic memory: when recognition fails. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104, 5-29.
- Wearden, J. H. (1991). Do humans possess an internal clock with scalar timing properties? *Learning and Motivation*, 22, 59-83.
- Wearden, J. H. (1992). Temporal generalization in humans. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 18, 134-144.
- Wearden, J. H. (1999). "Beyond the fields we know...": exploring and developing scalar timing theory. *Behavioural Processes*, 45, 3-21.
- Wearden, J. H. & Bray, S. (2001). Scalar timing without reference memory? Episodic temporal generalization and bisection in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54B, 289-309.
- Wearden, J. H. & Culpin, V. (1998). Exploring scalar timing theory with human subjects. In: V. DeKeyser, G. d'Ydewalle & A. Vandierendonck (Eds.), *Time and the dynamic control of behavior* (pp. 33-49). Göttingen: Hogrefe & Huber Publishers.
- Wearden, J. H., Edwards, H., Fakhri, M. & Percival, A. (1998). Why "sounds are judged longer than lights": Application of a model of the internal clock in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51B, 97-120.
- Wearden, J. H. & Ferrara, A. (1993). Subjective shortening in humans' memory for stimulus duration. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45B, 163-186.
- Wearden, J. H. & Ferrara, A. (1995). Stimulus spacing effects in temporal bisection by humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 48B, 289-310.
- Wearden, J. H. & Ferrara, A. (1996). Stimulus range effects in temporal bisection by humans.

- The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49B, 24-44.
- Wearden, J. H., Pilkington, R. & Carter, E (1999). "Subjective lengthening" during repeated testing of a simple temporal discrimination. *Behavioural Processes*, 46, 25-38.
- Wearden, J. H. & Towse, J. N. (1994). Temporal generalization in humans: three further studies. *Behavioural Processes*, 32, 247-264.
- Wickens, C. D. (1980). The structure of attentional resources. In R. S. Nickerson (Ed.), *Attention and performance*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Woodrow, H. (1928). Behavior with respect to short temporal stimulus forms. *Journal of Experimental Psychology*, 11, 167-198.
- Woodrow, H. (1951). Time perception. In S. S. Stevens (Ed.), *Handbook of experimental psychology*. New York: Wiley.
- Zakay, D. (1989). Subjective time and attentional resource allocation: An integrated model of time estimation. In I. Levin & D. Zakay (Eds.), *Time and human cognition: A life-span perspective* (pp. 365-397). Amsterdam: North-Holland.
- Zakay, D. (1990). The evasive art of subjective time measurement: some methodological dilemmas. In R. A. Block (Ed.), *Cognitive models of psychological time* (pp. 59-84). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Zakay, D. (1993a). Relative and absolute duration judgments under prospective and retrospective paradigms. *Perception & Psychophysics*, 54, 565-644.
- Zakay, D. (1993b). Time estimation methods – do they influence prospective duration estimates? *Perception*, 22, 91-101.
- Zakay, D. (2000). Gating or switching? Gating is a better model of prospective timing (a response to 'switching or gating' by Lejeune). *Behavioural Processes*, 50, 1-7.
- Zakay, D. & Block, R. A. (1996). The role of attention in time estimation processes. In M. A. Pastor & J. Artieda (Eds.), *Time, internal clocks and movement* (pp. 143-164). Amsterdam: Elsevier.
- Zakay, D. & Block, R. A. (1998). New perspectives on prospective time estimation. In V. de Keyser, G. d'Ydewalle & A. Vandierendonck (Eds.), *Time and the dynamic control of*

behavior. Seattle: Hogrefe & Huber Publishers.

Zeiler, M. D. (1991). Ecological influences on timing. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 17, 13-25.

Zimmer, H. D. (1993). Modalitätsspezifische Systeme der Repräsentation und Verarbeitung von Information. Überflüssige Gebilde, nützliche Fiktionen, notwendiges Übel oder zwangsläufige Folge optimierter Reizverarbeitung. *Zeitschrift für Psychologie*, 201, 203-235.

Appendix

Appendix 1

Methoden der zeitpsychologischen Forschung in alphabetischer Reihenfolge

Im folgenden werden diejenigen psychologischen Methoden der Zeitbeurteilung dargestellt, die im vorangegangenen Teil erwähnt bzw. grob skizziert wurden.

Bisektions-Diskriminationsaufgabe

In einer typischen Bisektionsaufgabe lernen die Versuchsteilnehmer zwei verschiedene Zeitintervalle (*kurz* versus *lang*) zu unterscheiden. In einer anschließenden Testphase werden den Versuchsteilnehmern wiederholt Intervalle dargeboten, die hinsichtlich ihrer Länge *zwischen* den beiden gelernten Intervallen liegen (es können auch ergänzend das gelernte kurze und lange Intervall präsentiert werden). Die Aufgabe besteht darin, die dargebotenen Intervalle als *eher kurz* bzw. als *eher lang* zu klassifizieren. Üblicherweise wird in der Datenanalyse die Häufigkeit der *eher lang*-Antworten gegen die Stimulusdauer abgetragen. Die drei wichtigsten Meßwerte sind der PSE (*point of subjective equality*), der DL (*difference limen*) und die WF (*weber fraction*).

Der PSE ist diejenige (theoretische) Signaldauer, die die Versuchsteilnehmer genauso häufig als *eher lang* wie auch als *eher kurz* klassifizieren. Er repräsentiert den subjektiven Mittelpunkt zwischen der kurzen und der langen Dauer.

Der DL gibt die Steigung der psychophysischen Funktion an. Der DL wird interpretiert als Maß der Präzision, mit der ein Versuchsteilnehmer die Intervalle klassifiziert. Je steiler die Funktion, desto besser die Klassifikation; je flacher die Funktion, desto höher die Variabilität der Schätzung.

Die WF ist gleich dem DL dividiert durch den PSE ($WF = DL / PSE$) und liefert ein Maß für die Variabilität der Schätzung in Abhängigkeit von der jeweiligen Stimulusdauer.

Delayed-matching-to-sample- (DMTS-) Methode

Die DMTS-Methode wird überwiegend in Tierexperimenten verwendet. In ihrer einfachsten Version wird in einem Versuchsdurchgang ein Stimulus bestimmter Dauer dargeboten (z. B. ein rotes Licht für 1000 ms). Anschließend folgen zwei Vergleichsstimuli (z. B. ein roter Knopf und ein grüner Knopf). Die Reaktion des Versuchstieres auf einen der beiden Knöpfe wird verstärkt, die Reaktion auf den anderen Knopf nicht. Es folgt das sog. *intertrial interval*, mit dessen Ende ein neuer Versuchsdurchgang beginnt. Zur Untersuchung des Kurzzeitgedächtnisses für Zeitintervalle werden in der Regel sowohl die Darbietungsdauer der Stimuli als auch das *intertrial interval* variiert. Abhängige Variable ist z. B. die Häufigkeit, mit der die Tiere nach Darbietung eines Stimulus die im Sinne der Versuchsanordnung richtige Reaktion ausführen.

Fixed-interval- (FI-) Methode

Diese Methode wird meist in Tierversuchen angewendet. Dabei wird die erste Reaktion des Versuchstieres nach einem bestimmten, fixen Intervall (das z. B. durch die Anwesenheit eines kontinuierlichen Lichtsignals angezeigt wird) verstärkt. Nach der Reaktion des Tieres folgt die Beendigung des Signals, und ein neuer Versuchsdurchgang beginnt. Typischerweise steigt die Häufigkeit der Reaktionen, je näher der erwartete Zeitpunkt der Verstärkung rückt.

Paarvergleichsaufgabe

In einer Paarvergleichsaufgabe werden den Probanden zwei Stimulusdauern präsentiert, die sie miteinander vergleichen sollen. Dabei ist eine der beiden Dauern der Standard, mit dem die zweite Dauer (Vergleichsdauer) verglichen werden soll. Variiert werden in diesem Design neben der Dauer selbst z. B. die Reihenfolge der Darbietung (zuerst der Stan-

dard, dann der Vergleichsreiz und vice versa) und das Interstimulusintervall. Die Aufgabe besteht in der Regel darin anzugeben, ob der Vergleichsreiz gleich dem Standard bzw. kürzer oder länger als der Standard ist. Ausgewertet werden z. B. die Häufigkeit der korrekten Antworten bzw. die Häufigkeit der „gleich“- „länger“- oder „kürzer“-Antworten.

Peak-interval- (PI-) Methode

Diese Aufgabe ist eine modifizierte *Fixed-interval*-Aufgabe. Während bei jener nur Reaktionen registriert werden, die *bis* zu einem kritischen Zeitpunkt abgegeben werden (die erste Reaktion *nach* dem kritischen Zeitpunkt beendet den jeweiligen Versuchsdurchgang), gestattet die PI-Methode auch die Aufzeichnung und Auswertung von Reaktionen *nach* einem kritischen Zeitpunkt bzw. jenseits eines bestimmten Intervalls. Wie bei der FI-Aufgabe werden Versuchstiere (manchmal auch Versuchspersonen; vgl Rakitin et al., 1998) trainiert, ein bestimmtes, fixes Intervall zu lernen. In einer anschließenden Testphase bleiben einige Versuchsdurchgänge ohne Verstärkung, und das Signal dauert über den kritischen Zeitpunkt hinaus an (*peak trials*). Werden die Reaktionen der Versuchstiere über die einzelnen Versuchsdurchgänge zusammengefaßt, ergibt sich meist eine annähernd normale Verteilung der Reaktionshäufigkeit in Abhängigkeit von der Signaldauer. Drei Maße werden häufig berechnet und ausgewertet: *peak rate*, *peak time* und *spread* der Verteilung.

Mit *peak rate* wird die maximale Reaktionshäufigkeit bezeichnet, *peak time* ist der Zeitpunkt, an dem am häufigsten reagiert wird, und *spread* meint die Breite der Funktion (als Maß der Variabilität der Intervallbeurteilung).

Produktionsmethode

Bei der Produktionsaufgabe sollen Versuchspersonen einen Stimulus (z. B. einen Ton) produzieren, dessen Dauer sich nach der Instruktion richtet. Bspw. besteht die Aufgabe darin, einen Ton von einer Sekunde Dauer zu produzieren. Das Besondere an dieser Methode

ist, daß sie keine Vergleichsaufgabe im eigentlichen Sinne ist, da kein externer Vergleichsreiz zur Verfügung steht. Meistens werden Intervalle per Knopfdruck (auf einer Computertastatur) produziert.

Reproduktionsmethode

Wie bei der Produktionsaufgabe werden auch in der Reproduktionsaufgabe Intervalle z. B. per Tastendruck produziert. Der Unterschied ist, daß das zu produzierende Intervall nicht über die Instruktion (also verbal), sondern als faktisches Intervall vorgeben wird. Bspw. hört eine Versuchsperson einen Ton von 500 ms Dauer und wird aufgefordert, diesen Ton so zu reproduzieren, daß seine Dauer der vorgegebenen entspricht.

Single Stimulus-Methode

Bei dieser Methode wird in jedem Versuchsdurchgang einer von zwei möglichen Stimuli bestimmter Dauer (*kurz* versus *lang*) dargeboten. Die Versuchsperson soll angeben, ob die Dauer des dargebotenen Stimulus die kurze oder die lange ist.

Temporal Generalization

Siehe S. 95ff.

Verbale Schätzung

Bei dieser Aufgabe sollen Versuchspersonen die Dauer eines Stimulus durch (verbale oder schriftliche) Angabe einer Größeneinheit (meist Zeiteinheit) schätzen. Bspw. soll nach Darbietung eines Stimulus dessen Dauer in Millisekunden angegeben werden.

Appendix 2

Entscheidungszeiten

Tabelle A zeigt die gemittelten Zeiten von der Darbietung des Signals bis zur Entscheidung über dessen Dauer in der Testphase.

Tabelle A. Über alle Versuchspersonen gemittelte Entscheidungszeiten (in Millisekunden) und Standardabweichungen.

<i>Experiment</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
1	1986	1203
2	1893	1101
3	1596	1116
4	1756	1774
5	4176	5810
6	1833	2666

Appendix 3

Ableitung der Grenzwerte unter der Annahme der Veränderung der Gedächtnisdauer s .

(a) Annahme der Additivität

Für die VIS/AUD-Bedingung gelte:

Eine Versuchsperson entscheide sich für die Gleichheit von s und t , wenn

$$\frac{|s + f - 1/0.92 t|}{1/0.92 t} < b.$$

Die Bestimmung des unteren Grenzwertes von f erfolgt analog zur Bestimmung des unteren Grenzwertes unter der Annahme der Veränderung der wahrgenommenen Dauer t nach:

$$\frac{|400 + f_u - 1/0.92 \cdot 400|}{1/0.92 \cdot 400} < \frac{|400 + f_u - 1/0.92 \cdot 500|}{1/0.92 \cdot 500}.$$

In vereinfachter Darstellung:

$$\frac{|f_u - 34.7826087|}{434.7826087} < \frac{|f_u - 143.4782609|}{543.4782609}.$$

Es resultieren für $f_{u1,2}$:

$$f_{u1} = 82.69210749,$$

$$f_{u2} = -390.9046179.$$

$f_{u1} \approx 82.7$ ms ist somit der untere Grenzwert des Fehlers.

Die Bestimmung des oberen Grenzwertes von f erfolgt nach:

$$\frac{|400 + f_o - 0.92 \cdot 500|}{0.92 \cdot 500} < \frac{|400 + f_o - 0.92 \cdot 600|}{0.92 \cdot 600}$$

bzw.

$$\frac{|f_o - 60|}{460} < \frac{|f_o - 152|}{552}.$$

Es resultieren für f_{o1} und f_{o2} :

$$f_{o1} = 101.8181818181,$$

$$f_{o2} = -400.$$

$f_{o1} \approx 101.81$ ms ist somit der obere Grenzwert des Fehlers.

(b) Annahme der Proportionalität

Bei Annahme von Proportionalität des Fehlers besteht zwischen der Verringerung der wahrgenommenen Dauer t und der Referenzdauer s Äquivalenz, da

$$|s - xtF| / xtF = |s/F - xt| / xt,$$

mit $x \in M = \{x_1 = 0.92; x_2 = 1/0.92\}$.

Beweis: $(s - xtF) / xtF = s / xtF - 1$.

Ebenso ist $(s/F - xt) / xt = s/F / xt - 1 = s / xtF - 1$.

Daraus folgt, daß unter der Proportionalitätshypothese bei beiden Annahmen identische Grenzwerte resultieren.

Zusammenfassung

Auf die Frage, ob die jeder Wahrnehmung inhärente Sinnesmodalität auch Teil der Gedächtnisrepräsentation von kurzen Zeitintervallen ist, konnte in dieser Studie mit sechs Experimenten eine Antwort gefunden werden. In Experiment 1 und 2 wurde festgestellt, daß Versuchspersonen dargebotene Zeitintervalle systematisch unterschätzten, wenn sich die Darbietungsmodalität (auditiv versus visuell) von der Modalität einer vorangegangenen Trainingsphase unterschied. Mit Experiment 3 wurde gezeigt, daß innerhalb der auditiven Modalität Veränderungen der Stimulusqualität zwischen Trainings- und Testphase zwar einen Einfluß auf die Testleistung hatten, jedoch zu keiner systematischen Verschätzung dargebotener Intervalle führten. Mit zwei weiteren Experimenten wurde bestimmt, daß der Schätzfehler additiv und in etwa ein Ausmaß von 80 bis 100 ms aufweist. Schließlich konnte gezeigt werden, daß die Beziehung zwischen Modalität und Dauer auf Gedächtnisebene als Assoziation zwischen einem über jeden Sinneskanal zugänglichen Zeitgedächtnis und der jeweiligen Enkodierungsmodalität charakterisiert werden kann.

Insgesamt ist also davon auszugehen, daß in der Tat ein Zusammenhang zwischen der Gedächtnisrepräsentation einer Dauer und der Modalität ihrer Enkodierung besteht und das Zeitgedächtnis als modal, d. h. als auf die Modalität bezogen, bezeichnet werden kann.